



**João Emanuel Pereira Gandaio**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Estudo da consolidação em solos areno-siltosos com recurso à célula de Rowe. Comparação com ensaios edométricos tradicionais**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Doutora Maria Teresa Grilo Santana,  
FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof<sup>a</sup> Doutora Ana Paula Varatojo  
Arguente: Prof. Doutor João Paulo Bilé Serra  
Vogal: Prof<sup>a</sup> Doutora Maria Teresa Grilo Santana



**FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

**Janeiro 2012**





**João Emanuel Pereira Gandaio**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Estudo da consolidação em solos areno-siltosos com  
recurso à célula de Rowe. Comparação com ensaios  
edométricos tradicionais**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Doutora Maria Teresa Grilo Santana,  
FCT-UNL



**FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

**Janeiro 2012**



Estudo da Consolidação com Recurso à Célula de Rowe. Comparação com Ensaios Edométricos  
Tradicionais

“Copyright” de João Emanuel Pereira Gandaio da FCT/UNL e da UNL

Eu, João Emanuel Pereira Gandaio concedo à Faculdade de Ciências e Tecnologias e à Universidade Nova de Lisboa o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado àqueles que deram a sua contribuição para que esta dissertação fosse realizada, a todos deixo o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Professora Doutora Teresa Santana pela disponibilidade diariamente demonstrada, pelos ensinamentos transmitidos e pela orientação e revisão da dissertação;

À Professora do Externato Dom Fuas Roupinho, Aldina Oliveira pelo apoio e orientação numa fase mais atribulada da minha vida estudantil;

Ao Jorge Silvério, Carlos Mata, Joana Faneco e à Ana Barra pelo apoio na realização dos trabalhos laboratoriais, à Professora Maria José e à Sofia pela disponibilidade e ajuda na revisão do texto;

A todos os amigos que me acompanham desde os tempos do secundário, e àqueles que tive a sorte de conhecer ao longo do curso, pelo ambiente que criaram, foram sempre um estímulo para alcançar os meus objectivos, destacando em particular o David Vaz e o Flávio Quintino pelas horas partilhadas ao longo do curso e da dissertação de mestrado, à Vanessa Lucas, ao Bruno Gerardo, ao Hugo Macatrão e ao Diogo Pombeiro pelas horas passadas em viagem da Nazaré para Almada.

Aos serviços de acção social da Universidade Nova, em particular Doutor Paulo Silva, pois com o seu apoio permitiram que atingisse as metas estabelecidas no início do curso, e por juntamente com o Diogo Gonçalves, a Joana Afonso, a Tania Quintaos, o João Machado, o João Faria, a Alexandra Silva, a Tininha, a Filipa Calisto, a Fátima de Pinho, a Estela de Pinho, o Avelino e a minha tia Tina, me terem apoiado nesta última fase em que estive prestes a não ter forças para concluir a dissertação.

Ao José Ferreira e à minha família por todo o apoio prestado, principalmente à minha mãe e irmão pela preocupação e conselhos permanentes que me valorizaram como homem.

Por último, um agradecimento muito especial à Júlia, por ter suportado a ausência do namorado em vários momentos, tendo com todo o seu amor, apoio e incentivo feito com que acreditasse que tudo era possível, estando sempre presente ao longo destes anos e fazendo com que eu nunca perdesse o sorriso até bem perto do final desta etapa.

Dedico esta dissertação à minha avó pois nos dias de hoje ter tempo é difícil, e mesmo que nós nem sempre tivéssemos tempo para ela, ela sempre teve tempo para nós.





# RESUMO

Com este estudo pretendeu-se utilizar a célula de Rowe, ainda pouco difundida em Portugal, para a realização do ensaio de consolidação em articulação com a norma BS1377.

Para o efeito descreve-se a célula de Rowe existente no laboratório de mecânica dos solos do departamento de engenharia civil, os procedimentos de ensaio adoptados e o software de aquisição de dados utilizado. Realizaram-se dois ensaios distintos: o ensaio edométrico convencional e o ensaio de consolidação na célula de Rowe, este último com leitura das pressões intersticiais, o que levou à determinação do coeficiente de consolidação por um método adicional aos dois métodos tradicionalmente utilizados.

Este estudo permitiu demonstrar as vantagens da célula de Rowe para o estudo da consolidação, atingindo-se o final da consolidação, a totalidade da pressão intersticial é dissipada, num tempo mais curto para cada patamar de carga. Constatou-se ainda que o método apresentado para determinação do coeficiente de consolidação permitiu obter resultados com o andamento característico dos métodos habitualmente utilizados.

**Palavras-Chave:** aquisição e controle de dados, consolidação, célula de Rowe, British Standards, pressão intersticial.



# ABSTRACT

This study pretends to use Rowe cell, which remains little understood in Portugal, to evaluate the consolidation in the Rowe cell, whilst taking into account the *BS 1377* guidelines.

For this purpose the Rowe cell existent in the soil mechanics laboratory was described, as well as the procedure of the test and the acquisition and control software that we use. Two distinct tests were performed, the standard oedometer test and the consolidation test in the Rowe cell, which permit us to check the behavior of the pore pressure during the process. The pore pressure measurement enables the determination of the consolidation coefficient by a distinct method other than the two traditional methods.

The study enabled the demonstration of the advantages of using the Rowe cell to the study of consolidation, enabling a less time consuming procedure, as well as increasing the amount of known data along the whole process. It was verified that the method presented for the determination of the coefficient of consolidation obtained results which follow the general trend of the commonly used methods.

**Key words:** data acquisition and control, consolidation, Rowe cell, British Standards, pore pressure.



# ÍNDICE

<b>RESUMO.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações preliminares.....	1
1.2 Objectivo da dissertação.....	1
1.3 Estrutura da dissertação .....	2
<b>2. REVISÃO DE MATÉRIAS .....</b>	<b>3</b>
2.1 Introdução.....	3
2.2 Cálculo dos assentamentos .....	3
2.2.1 Solos normalmente consolidados.....	3
2.2.2 Determinação da tensão de pré-consolidação .....	4
2.3 Teoria da consolidação .....	5
2.3.1 Teoria de Terzaghi para a consolidação unidimensional .....	5
2.3.2 Cálculo do assentamento em qualquer instante.....	7
2.3.3 Grau de consolidação .....	7
2.4 Métodos de determinação do coeficiente de consolidação $c_v$ .....	8
2.4.1 Generalidades.....	8
2.4.2 O método de Casagrande.....	9
2.4.3 O método de Taylor .....	10
2.4.4 O método da dissipação da pressão intersticial .....	11
<b>3. ENSAIOS DE CONSOLIDAÇÃO .....</b>	<b>13</b>
3.1 Introdução.....	13
3.2 Ensaio edométrico .....	13
3.3 Histórico da célula de consolidação .....	13
3.3.1 Evolução histórica.....	13
3.3.2 Vantagens e desvantagens da célula de Rowe.....	15
3.4 Ensaios de consolidação especiais.....	18
3.4.1 Descrição geral.....	18
3.4.2 Ensaio de consolidação com gradiente de pressão intersticial constante (CG).....	19
3.4.3 Ensaio de consolidação com fluxo restringido (RFC).....	20
3.4.4 Ensaio de consolidação com velocidade constante de carregamento (CRL) .....	20
3.4.5 Ensaio de consolidação com taxa de deformação constante (CRS) .....	21
3.4.6 Ensaio de consolidação com razão pressão intersticial/tensão aplicada constante (CPR) .....	22
<b>4. CÉLULA DE ROWE E SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS EXISTENTES NO DEC.....</b>	<b>25</b>
4.1 Introdução.....	25
4.2 Célula de Rowe.....	25
4.2.1 Componentes e acessórios da célula de Rowe .....	25

4.2.2 Equipamento auxiliar .....	27
4.3 Software de aquisição de dados existente no DEC.....	30
4.3.1 Descrição geral.....	30
4.3.2 Módulos de software adoptados no estudo experimental.....	31
<b>5. ESTUDO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>33</b>
5.1 Introdução.....	33
5.2 Normas utilizadas .....	33
5.3 Material ensaiado.....	34
5.4 Ensaio edométrico convencional .....	36
5.4.1 Montagem do provete.....	36
5.4.2 Condições e tipo de ensaio .....	37
5.5 Ensaio de consolidação na célula de Rowe .....	37
5.5.1 Preparação e montagem do provete na célula de Rowe .....	37
5.5.2 Condições e tipo de ensaio .....	39
5.6 Resultados dos ensaios realizados com a célula de Rowe .....	40
5.6.1 Saturação .....	40
5.6.2 Carregamento não drenado e consolidação .....	42
5.6.3 Assentamentos segundo a BS 1377.....	45
5.7 Comparação de resultados .....	46
5.7.1 Ensaio edométrico vs célula de Rowe .....	46
5.7.2 Coeficientes de consolidação .....	49
<b>6. CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS.....</b>	<b>51</b>
6.1 Conclusões.....	51
6.2 Estudos futuros .....	52
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO D.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO E.....</b>	<b>75</b>

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 5.1 – Indicações da ASTM D 2435-04 e BS 1377 Parte 6 para o ensaio de consolidação .	34
Quadro 5.2 – Material passado na peneiração fina .....	34
Quadro 5.4 – Classificação do solo .....	35
Quadro 5.3 – Propriedades físicas do solo ensaiado .....	35
Quadro 5.5 – Apresentação dos patamares de carregamento em kPa no ensaio edométrico .....	37
Quadro 5.6 – Apresentação da leitura a tempos utilizada no ensaio edométrico .....	37
Quadro 5.7 – Resumo das características.....	37
Quadro 5.8 – Dimensões do provete a utilizar na célula de Rowe.....	38
Quadro 5.9 – Plano do ensaio de consolidação na célula de Rowe.....	40
Quadro 5.10 – Grau de saturação em função da tensão aplicada ao provete .....	41
Quadro 5.11 – $C_v$ 's pelo método de Taylor e Casagrande no ensaio edométrico .....	49
Quadro 5.12 – $C_v$ 's pelo método da dissipação da pressão intersticial na célula de Rowe .....	50
Quadro E.1 – Características do ensaio de consolidação .....	71
Quadro E.2 – Boletim referente à fase de saturação .....	72
Quadro E.3 – Boletim referente às leituras durante a fase de consolidação.....	73
Quadro E.4 – Boletim referente aos cálculos realizados.....	74





# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Variação do índice de vazios em função da tensão efectiva (adaptado de Santana, T., 2005) .....	3
Figura 2.2 – Construção de Casagrande para a obtenção da tensão de pré-consolidação (adaptado de Santana, T., 2005).....	4
Figura 2.3 – Modelo de Terzaghi para a teoria da consolidação.....	5
Figura 2.4 – Variação da tensão total, efectiva e pressão intersticial para um carregamento $\Delta\sigma_v$ (adaptado de Fernandes, M.M., 1994) .....	5
Figura 2.5 – Distribuição da pressão intersticial com a profundidade (adaptado de Santana, T., 2005) .....	6
Figura 2.6 – Grau de consolidação médio em função do factor tempo (adaptado de Santana, T., 2005) .....	7
Figura 2.7 – Gráfico para determinação de $c_v$ no método de Casagrande (adaptado de Fernandes, M.M., 1994) .....	9
Figura 2.8 – Gráfico para a determinação de $c_v$ no método de Taylor (adaptado de Budhu, M., 2007) .....	10
Figura 2.9 – Gráfico para a determinação de $c_v$ no método da dissipação da pressão intersticial ...	12
Figura 3.1 – Esquematização da célula de Rowe utilizada (Head, 1986) .....	15
Figura 3.2 – Diferentes combinações na célula de Rowe (adaptado de Head, 1986) .....	17
Figura 3.3 – Andamento característico da tensão vertical para o ensaio edométrico convencional	18
Figura 3.4 – Representação do ensaio de consolidação com gradiente de pressão intersticial constante.....	19
Figura 3.5 – Representação do ensaio de consolidação com fluxo restringido.....	20
Figura 3.6 – Representação do ensaio de consolidação com velocidade constante de carregamento .....	21
Figura 3.7 – Representação do ensaio de consolidação com velocidade de deformação constante.	22
Figura 3.8 – Representação do ensaio de consolidação que a razão entre a pressão intersticial e a pressão aplicada é constante.....	23
Figura 4.1 – Célula de Rowe existente no laboratório do DEC .....	25
Figura 4.2 – Base e corpo da célula de Rowe .....	26
Figura 4.3 – Topo da célula de Rowe.....	26
Figura 4.4 – Esquema de válvulas na célula de Rowe .....	27
Figura 4.5 – Controladores de pressão.....	28
Figura 4.6 – Transdutor da pressão intersticial .....	28
Figura 4.7 – Deflectómetro .....	29
Figura 4.8 – Sistema de aquisição automática de dados na célula de Rowe (GDS, 1992) .....	29
Figura 4.9 – Introdução das propriedades do provete no GDSLlab .....	30
Figura 4.10 – Ambiente de trabalho do Software GDSLlab .....	31
Figura 4.11 – Exemplo de dois tipos de ensaio disponíveis no software para a consolidação.....	32
Figura 5.1 – Curva granulométrica do solo ensaiado.....	35
Figura 5.2 – Curva de compactação do solo .....	36
Figura 5.3 – Equipamento utilizado no edométrico convencional .....	36
Figura 5.4 – Ajuste do provete às dimensões pretendidas.....	38
Figura 5.5 – Colocação do anel e do provete na base da célula de Rowe .....	38

Figura 5.6 – Pressão intersticial ao longo de um estágio de saturação (Estágio 3) .....	41
Figura 5.7 – Pressão intersticial ao longo do tempo na fase de build up.....	42
Figura 5.8 – Pressão intersticial em função do logaritmo do tempo para a fase de consolidação....	42
Figura 5.9 – Sobreposição do build-up com a fase de consolidação .....	43
Figura 5.10 – Percentagem de pressão intersticial dissipada.....	43
Figura 5.11 – Sobreposição de dois estágios de carregamento no ensaio na célula de Rowe .....	44
Figura 5.12 – Evolução da pressão intersticial ao longo do patamar de descarga.....	44
Figura 5.13 – Percentagem de pressão intersticial absorvida na descarga .....	45
Figura 5.14 – Deslocamento axial do provete para o carregamento .....	45
Figura 5.15 – Deslocamento axial no provete para a descarga .....	46
Figura 5.16 – Índice de vazios em função da tensão efectiva para o ensaio edométrico .....	47
Figura 5.17 – Construção de Casagrande para o ensaio edométrico .....	47
Figura 5.18 – Índice de vazios em função da tensão efectiva para o ensaio na célula de Rowe.....	48
Figura 5.19 – Construção de Casagrande para o ensaio na célula de Rowe.....	48
Figura E.1 – Provede a colocar na célula de Rowe .....	59
Figura E.2 – Aplicação do silicone na superfície da membrana .....	60
Figura E.3 – Determinação do $c_v$ pelo método de Taylor para $\sigma'_v = 98$ kPa .....	76
Figura E.4 – Determinação do $c_v$ pelo método de Taylor para $\sigma'_v = 12,5$ kPa e OCR = 15,7 .....	76
Figura E.5 – Determinação do $c_v$ pelo método de Taylor para $\sigma'_v = 196$ kPa .....	76
Figura E.6 – Determinação do $c_v$ pelo método de Taylor para $\sigma'_v = 391$ kPa .....	76
Figura E.7 – Determinação do $c_v$ pelo método de Taylor para $\sigma'_v = 12,5$ kPa e OCR = 62,6 .....	76
Figura E.8 – Determinação do $c_v$ pelo método de Casagrande para $\sigma'_v = 98$ kPa .....	76
Figura E.9 – Determinação do $c_v$ pelo método de Casagrande para $\sigma'_v = 12,5$ kPa e OCR = 15,7 ..	76
Figura E.10 – Determinação do $c_v$ pelo método de Casagrande para $\sigma'_v = 196$ kPa .....	76
Figura E.11 – Determinação do $c_v$ pelo método de Casagrande para $\sigma'_v = 391$ kPa .....	76
Figura E.12 – Determinação do $c_v$ pelo método de Casagrande para $\sigma'_v = 12,5$ kPa e OCR 62,9 ...	76
Figura E.13 – Determinação do $c_v$ pelo método da dissipação da pressão intersticial para $\sigma'_v = 50$ kPa.....	76
Figura E.14 – Determinação do $c_v$ pelo método da dissipação da pressão intersticial para $\sigma'_v = 200$ kPa.....	76
Figura E.15 – Determinação do $c_v$ pelo método da dissipação da pressão intersticial para $\sigma'_v = 400$ kPa.....	76

# LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

## Símbolos

$c_h$	coeficiente de consolidação para drenagem horizontal
$c_v$	coeficiente de consolidação para drenagem vertical
$c_p$	contrapressão
$d$	comprimento de drenagem
$e$	índice de vazios
$e_0$	índice de vazios inicial
$e_1$	índice de vazios no final da análise
$H$	altura do provete
$\bar{H}$	altura média do provete
$H_O$	altura corrigida do provete
$H_0$	altura inicial do provete
$H_1$	altura no instante 1
$H_2$	altura no instante 2
$H_{50}$	altura do provete para 50% da consolidação
$H_{90}$	altura do provete para 90% da consolidação
$H_{100}$	altura final do provete
$k$	coeficiente de permeabilidade
$m_v$	coeficiente de compressibilidade volumétrica
$t$	tempo
$t_1$	tempo de ensaio no instante 1
$t_2$	tempo de ensaio no instante 2
$t_{50}$	tempo para 50 % da consolidação
$t_{90}$	tempo para 90 % da consolidação
$T_v$	factor tempo
$U_z$	grau de consolidação
$\bar{U}_z$	grau de consolidação médio
$u$	pressão intersticial num determinado instante
$u_1$	pressão intersticial no instante 1
$u_2$	pressão intersticial no instante 2
$u_b$	pressão intersticial na base
$u_c$	pressão intersticial na face não drenada
$u_d$	pressão intersticial após o “build up” da pressão intersticial
$u_e$	excesso de pressão intersticial
$u_i$	pressão intersticial inicial
$z$	profundidade
$Z$	factor profundidade
$\lambda$	razão entre a pressão intersticial e a tensão aplicada
$\gamma_w$	peso específico da água
$\rho_0$	tensão inicial no diafragma
$\rho_d$	tensão no diafragma após o “build up” da pressão intersticial
$\sigma_0$	tensão vertical no inicio da análise
$\sigma_1$	tensão vertical na célula no instante 1
$\sigma_2$	tensão vertical na célula no instante 2
$\sigma_3$	tensão vertical na célula no instante 3
$\sigma_d$	tensão vertical na célula após o “build up” da pressão intersticial
$\sigma_v$	tensão vertical

$\sigma'$	tensão efectiva
$\sigma'_0$	tensão efectiva no início da análise
$\sigma'_1$	tensão efectiva no final da análise
$\sigma'_o$	tensão a que o solo se encontra sujeito
$\sigma'_p$	tensão de pré-consolidação
$\Delta e$	variação do índice de vazios desde o início do ensaio
$\Delta h$	assentamento
$\Delta h_i$	assentamento no instante inicial
$\Delta h_1$	assentamento no instante 1
$\Delta h_2$	assentamento no instante 2
$\Delta h_{50}$	assentamento a 50% da consolidação
$\Delta h_{90}$	assentamento a 90% da consolidação
$\Delta h_{100}$	assentamento no final
$\Delta H$	variação do deslocamento axial
$\Delta \sigma_v$	incremento de tensão no provete
$\delta e$	variação do índice de vazios para o patamar em análise
$\delta u$	variação da pressão intersticial
$\delta \sigma$	variação da tensão aplicada
$\delta \sigma'$	variação da tensão efectiva

## Abreviaturas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASTM D	American Society for Testing and Materials Description
BS	British Standards
BSI	British Standards Institution
CG	Constant Pore Pressure Gradient
CPR	Constant Pressure Ratio
CRS	Constant Rate of Strain
CRStrain	Módulo de software Constant Rate of Strain
CRL	Constant Rate of Load
CRLoad	Módulo de software Constant Rate of Load
DEC	Departamento de Engenharia Civil
EC 7	Eurocódigo 7
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologias
GDS	Global Digital System
GDSLlab	Global Digital System Laboratory
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNEC E	Laboratório Nacional de Engenharia Civil Especificação
Log t	Logaritmo do tempo
LPT1	Porta paralela física padrão do computador
min.	minutos
MUX	Multiplexer
NP	Norma Portuguesa
RS	Recommended Standard
RFC	Restricted Flow Consolidation
SETRA	Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
OCR	Grau de sobreconsolidação
UNL	Universidade Nova de Lisboa

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES**

A Engenharia Civil é tão relevante que se torna praticamente impossível pensar o mundo sem a sua existência. Sem a sua intervenção uma cidade reduzir-se-ia a um amontoado de barracas isoladas, sem comunicação, energia ou sistema de saneamento imperando portanto o caos.

O conceito de engenharia existe desde a antiguidade. Trata-se de uma ciência que, ao longo dos tempos se desenvolveu de forma progressiva, só ela está habilitada a lidar com projectos e construções de edifícios, estradas, túneis, metropolitanos, barragens, infra-estruturas portuárias e aeroportuárias entre outros. É através do conhecimento do engenheiro que se escolhem os lugares mais apropriados para uma construção, se verifica o material usado na obra, se fiscaliza o andamento do projecto, e antes de tudo se verifica-se a solidez e segurança do solo onde se pretende instalar a construção. Uma vez que dentro da Geotecnia, a disciplina que maior ênfase adquire, ao longo da dissertação que agora se introduz é a mecânica dos solos, apresenta-se a mesma de seguida.

A mecânica dos solos é reconhecida internacionalmente como tendo sido fundada por Karl Terzaghi que com o seu estudo sobre consolidação de solos, marcou o início deste ramo da ciência na engenharia.

A mecânica dos solos procura prever o comportamento dos maciços terrosos quando sujeitos a solicitações provocadas, por exemplo, por obras de engenharia. Para além de utilizarem o solo como elemento de construção, como acontece por exemplo, com as barragens e em terraplanagens para estradas, muitas das obras apoiam-se também sobre o solo. Torna-se imperioso estudar o desempenho do solo quando sujeito a diferentes carregamentos, pois caso provoquem deslocamentos excessivos influenciam a estabilidade, bem como o comportamento funcional e estético da obra.

Apesar de as obras na sua grande parte exibirem até à data um bom comportamento, sente-se que o tempo despendido nos ensaios de consolidação pode ser minimizado através de estudos experimentais que permitam executar o mesmo tipo de estudo mas num período de tempo inferior. Conseguindo-se com esta abordagem um maior equilíbrio entre a segurança, tempo e a economia.

## **1.2 OBJECTIVO DA DISSERTAÇÃO**

Tendo em conta as considerações preliminares, bem como a evolução quer dos sistemas automáticos de aquisição e processamento de dados nos ensaios de mecânica dos solos, quer dos próprios ensaios apresentam-se de seguida os objectivos que se pretendem alcançar ao longo da dissertação:

apresentar a célula de consolidação de Rowe, ainda pouco divulgada em Portugal;

estabelecer um procedimento de ensaio na célula de Rowe existente no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa em

articulação com a Norma “British Standard Methods of test for Soils for civil engineering purposes”, BS 1377;

comparar resultados obtidos do ensaio de consolidação na célula de Rowe sob égide da parte 6 da BS 1377 com o ensaio edométrico convencional;

pretende-se ainda que a dissertação que se apresenta suscite o interesse para estudos futuros utilizando o equipamento apresentado;

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação de mestrado é constituída por 6 capítulos e 5 Anexos.

No capítulo I tecem-se algumas considerações preliminares, indicam-se resumidamente os objectivos e apresenta-se a estrutura da dissertação.

O capítulo II apresenta uma revisão de matérias de forma resumida, dando particular atenção ao cálculo de assentamentos, teoria da consolidação, e à forma de determinação do coeficiente de consolidação.

No capítulo III apresenta-se o histórico da célula de consolidação, as características de carregamento e drenagem, associadas ao ensaio de consolidação na célula de Rowe, finaliza-se com a descrição dos tipos de ensaios de consolidação.

No capítulo IV faz-se uma descrição do equipamento e do software de processamento automático de aquisição de dados utilizados nesta dissertação.

No capítulo V é apresentado o estudo experimental, onde se dá a conhecer algumas normas e o material utilizado nos ensaios, bem como a metodologia adoptada. Apresentam-se ainda os cálculos, e análise dos resultados experimentais.

No capítulo VI apresentam-se as conclusões do estudo realizado, e dão-se a conhecer os estudos que podem desenvolver-se no futuro.

No Anexo A define-se o procedimento utilizado na preparação do provete utilizado no ensaio de consolidação.

No Anexo B apresenta-se a preparação da célula de consolidação para que se possa colocar o provete em condições de iniciar o ensaio de consolidação.

No Anexo C apresentam-se os passos necessários para a implementação do ensaio de consolidação segundo a BS 1377 na célula de Rowe.

No Anexo D apresentam-se alguns dos boletins de ensaio devidamente preenchidos após o ensaio de consolidação de acordo com a BS 1377.

No Anexo E apresentam-se as construções realizadas para a determinação do  $t_{50}$  e  $t_{90}$  para cada um dos três métodos utilizados na determinação dos coeficientes de consolidação.

## 2. REVISÃO DE MATÉRIAS

### 2.1 INTRODUÇÃO

Quando se aplica um carregamento não drenado, não existe variação de volume mas ocorre um incremento na pressão intersticial. Quando, após a aplicação do carregamento não drenado se permite a drenagem, dá-se início à expulsão da água dos vazios do solo iniciando-se então a consolidação. A velocidade com que a água sai dos vazios existentes no solo influencia a consolidação.

Pretende-se ao longo deste capítulo apresentar os fundamentos associados à teoria da consolidação. Apresentam-se as expressões associadas ao cálculo dos assentamentos no tempo relacionadas com a dissipação do excesso de pressão intersticial e os métodos para determinação do coeficiente de consolidação.

### 2.2 CÁLCULO DOS ASSENTAMENTOS

#### 2.2.1 Solos normalmente consolidados e sobreconsolidados

O estudo do histórico de tensões a que um solo já se encontrou submetido, pode ser realizado com base na curva apresentada na Figura 2.1. Pois, na curva que traduz a variação do índice de vazios em função do logaritmo da tensão efectiva, para além de se abranger um intervalo de tensões mais alargado, quando o solo se encontra sujeito a tensões superiores à máxima tensão vertical a que já tinha sido submetido, a curva torna-se uma recta.

Na Figura 2.1 as tensões já experimentadas pelo solo “in situ” encontram-se representadas pela zona de menor declive, solo normalmente consolidado. O troço rectilíneo diz respeito, às tensões que o solo ainda não experimentou. A tensão efectiva de maior valor a que o solo esteve, é a tensão de pré-consolidação  $\sigma'_p$ .

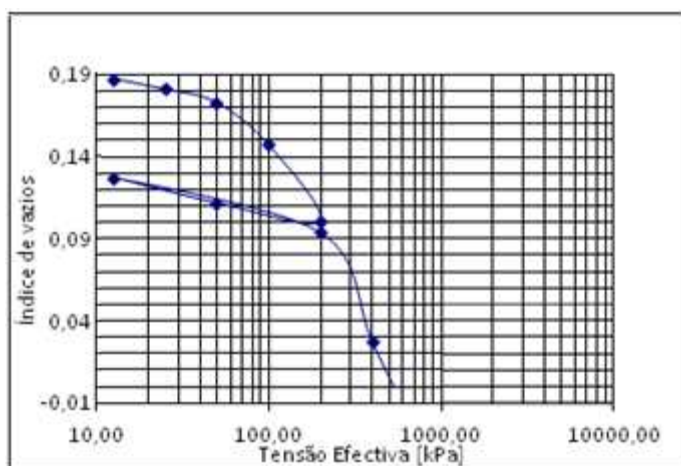


Figura 2.1 – Variação do índice de vazios em função da tensão efectiva (adaptado de Santana, T., 2005)

### 2.2.2 Determinação da tensão de pré-consolidação

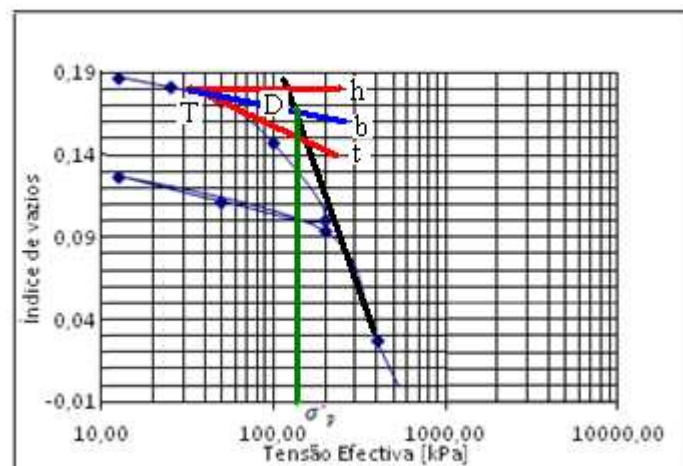
A determinação da tensão de pré-consolidação resulta da construção de Casagrande. Esta construção baseia-se nas curvas laboratoriais resultantes dos ensaios edométricos, nos quais se aplicam tensões.

Na Figura 2.2 apresenta-se a construção de Casagrande para a determinação da tensão de pré-consolidação, esquematizada de seguida:

localiza-se o ponto da curva índice de vazios em função do logaritmo da tensão, em que o raio de curvatura é mínimo, ponto T;

traça-se por este ponto uma recta horizontal, h, e uma tangente à curva, t, de seguida faz-se passar uma bissectriz ao ângulo formado por h e t,(b);

prolonga-se então a parte recta da curva de consolidação. O valor da tensão da pré-consolidação, resulta da intersecção, D, da parte recta com a bissectriz.



**Figura 2.2 – Construção de Casagrande para a obtenção da tensão de pré-consolidação (adaptado de Santana, T., 2005)**

Após a determinação de  $\sigma'_p$ , pode então determinar-se o grau de sobreconsolidação, OCR, que consiste na razão entre a tensão de pré-consolidação e a tensão a que o solo se encontra sujeito,  $\sigma'_o$ .

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_o}$$

$\sigma'_p$  é a tensão de pré-consolidação em kPa;

$\sigma'_o$ , tensão a que o solo se encontra sujeito em kPa



## 2.3 TEORIA DA CONSOLIDAÇÃO

### 2.3.1 Teoria de Terzaghi para a consolidação unidimensional

A teoria de consolidação de Terzaghi define de forma matemática a dissipação do excesso de pressão intersticial do solo no tempo e em profundidade. Na Figura 2.3 apresenta-se o modelo de Terzaghi para a teoria da consolidação, neste modelo o solo é representado pela mola, e a mola dentro de um cilindro com água, representa o solo saturado.

O modelo possui um orifício que ao não permitir a saída de água quando se aplica uma carga  $P$ , faz com que se desenvolva um excesso de pressão intersticial na água. Quando o orifício permite a saída de água, a mola desce, fazendo com que o solo comece a estar sujeito à carga. A consolidação termina quando o excesso de pressão intersticial na água estiver totalmente dissipado, ou seja, o efeito da carga  $P$  foi totalmente transferido para a mola

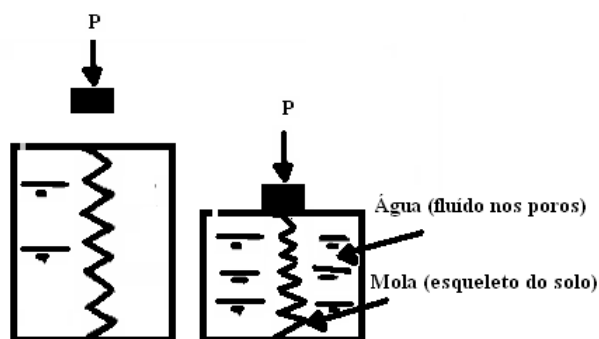


Figura 2.3 – Modelo de Terzaghi para a teoria da consolidação

A avaliação dos assentamentos ao longo do tempo segundo a teoria de Terzaghi baseia-se nas seguintes hipóteses, o solo ser homogéneo e encontrar-se totalmente saturado. A compressibilidade do solo deve-se em exclusivo à expulsão da água dos vazios. A consolidação e o fluxo devem ser unidireccionais, e a lei de Darcy deve ser válida. Deve existir uma relação linear entre a tensão efectiva e o índice de vazios, o que faz com que o coeficiente de compressibilidade e o coeficiente de variação do volume seja constante para qualquer fase da consolidação. Por fim deve considerar-se que o retardar da consolidação se deve em exclusivo à baixa permeabilidade do solo desprezando-se assim a consolidação secundária (Antão, A. 2008)

Ao carregar-se uma amostra de solo, a totalidade do incremento de tensão vertical resultante desta acção é suportada pelo aumento da pressão intersticial no instante inicial. Em condições drenadas à medida que a água drena dos poros e o esqueleto do solo se consolida, o excesso de pressão intersticial dissipa-se até que a pressão adicional seja inteiramente suportada pelo solo, atingindo-se assim o final da consolidação, como se representa na Figura 2.4.



Figura 2.4 – Variação da tensão total, efectiva e pressão intersticial para um carregamento  $\Delta\sigma_v$  (adaptado de Fernandes, M.M., 1994)

A equação de consolidação de Terzaghi quando se aplica uma carga num intervalo de tempo apresenta a seguinte forma:

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \times \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$$

Onde:  $u_e$  representa o excesso de pressão intersticial em kPa;

$c_v$  é o coeficiente de consolidação ( $\text{cm}^2/\text{min.}$ );

$k$  é o coeficiente de permeabilidade;

$m_v$  representa o coeficiente de compressibilidade volumétrica ( $\text{cm}^2/\text{kg}$ );

$z$  é a profundidade em metros;

$t$  é o tempo em minutos

Ao integrar-se a equação de consolidação de Terzaghi, obtêm-se a evolução no espaço e no tempo da dissipação do excesso pressão intersticial.

Apresenta-se então a solução da equação de Terzaghi para o solo com drenagem em ambas as direcções:

$$u_e = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2 \times u_e(0)}{M} \times (\text{sen} MZ) e^{-M^2 T_v}$$

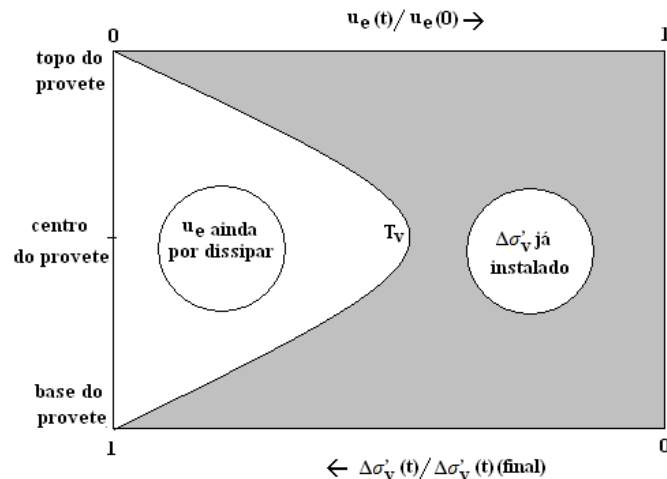
em que  $M = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$ ,  $m = 0,1,2,3,\dots$

$Z = \frac{z}{d}$  representa o factor profundidade;

$T_v = \frac{c_v \times t}{d^2}$ , representa o factor tempo;

Quando se representa graficamente a solução da equação de Terzaghi, obtêm-se a variação do excesso da pressão intersticial em função da profundidade, para vários valores de  $T_v$ .

Na zona sombreada da Figura 2.5 representa-se a tensão efectiva já instalada, bem como a consolidação que já ocorreu em toda a camada para um determinado instante, ou seja o valor médio do grau de consolidação ( $\bar{U}_z$ ) na espessura total da camada.



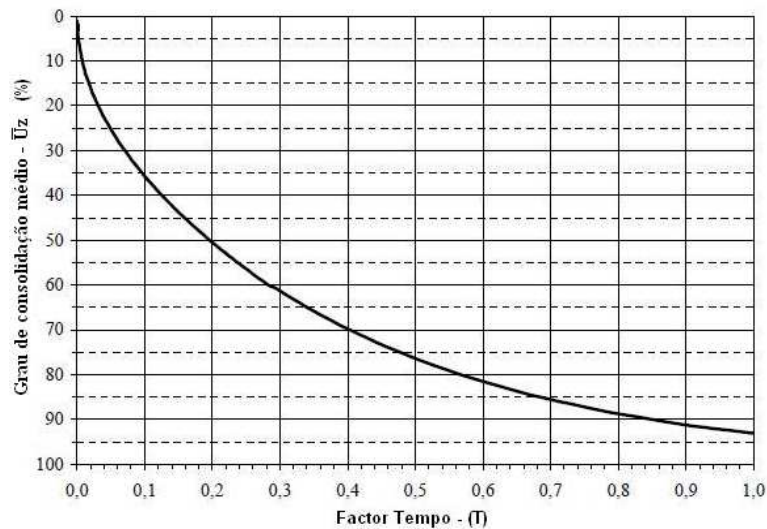
**Figura 2.5 – Distribuição da pressão intersticial com a profundidade (adaptado de Santana, T., 2005)**

### 2.3.2 Cálculo do assentamento em qualquer instante

Habitualmente pretende-se determinar um valor médio do grau de consolidação para a camada ao longo de toda a profundidade e para um dado instante, e não o grau de consolidação a uma determinada profundidade.

Após a aplicação do carregamento,  $\bar{U}_z$  decresce rapidamente mas o assentamento vai diminuindo de forma progressiva, ou seja, à medida que o grau de consolidação médio cresce a velocidade de dissipação de pressões intersticiais é menor. Apesar de nunca atingir esse valor  $\bar{U}_z$  tende para 1 (Figura 2.6), pelo que se pode dizer que a consolidação nunca termina, todavia admite-se na prática que  $T_v = 1$  para  $\bar{U}_z$  de 92% (Shah, D. et Shroff, A., 2003).

$$T_v = \frac{c_v \times t}{d^2} = 1 \leftrightarrow t = \frac{d^2}{c_v} = \gamma_w \times m_v \frac{d^2}{k}$$



**Figura 2.6 – Grau de consolidação médio em função do factor tempo (adaptado de Santana, T., 2005)**

Quando a drenagem se realiza nos dois sentidos e uma vez que o termo da espessura se encontra ao quadrado, pode dizer-se que nesses casos a consolidação se processa 4 vezes mais rapidamente que quando a drenagem se realiza apenas numa direcção.

Simplificadamente podem utilizar-se as seguintes expressões (Budhu, M, 2007):

$$T_v = \frac{\pi}{4} \left( \frac{U_z}{100} \right)^2, \text{ se } U_z < 60 \%$$

$$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U_z), \text{ se } U_z \geq 60 \%$$

### 2.3.3 Grau de consolidação

O grau de consolidação,  $U_z$  para um solo homogéneo depende da permeabilidade, espessura e comprimento de drenagem do solo. Portanto um solo com coeficiente de permeabilidade mais baixo comparativamente a outro vai demorar mais tempo a drenar o excesso de pressão intersticial inicial, e o assentamento ocorre a uma taxa inferior (Budhu, M, 2007).

Para um elemento de solo a uma profundidade específica  $z$ , o progresso do grau de consolidação quando o solo é sujeito a um dado carregamento pode representar-se em função do índice de vazios:

$$U_z = \frac{e_0 - e}{e_0 - e_1}$$

Em que  $U_z$  varia entre 0 e 1 e é definido como o grau de consolidação num determinado instante na profundidade  $z$ .

$e_0$  representa o índice de vazios antes do início da consolidação;

$e_1$  representa o índice de vazios no final da fase de consolidação;

$e$  representa o índice de vazios no instante em estudo;

O grau de consolidação pode ser definido por outro lado em função da tensão efectiva  $\sigma'$ . Para tal a curva índice de vazios em função tensão efectiva assume-se linear ao longo de todo o carregamento.

$$U_z = \frac{\sigma' - \sigma'_0}{\sigma'_1 - \sigma'_0}$$

$\sigma'_0$  representa a tensão efectiva antes do início da consolidação [kPa];

$\sigma'_1$  representa a tensão efectiva no final da fase de consolidação [kPa];

$\sigma'$  representa a tensão efectiva no instante em análise [kPa];

Apesar de no instante imediatamente seguinte à aplicação de um carregamento, a tensão total ter o valor do carregamento aplicado, a tensão efectiva apenas adquire o valor correspondente ao carregamento no final da fase de consolidação. Sendo  $\sigma'$  a tensão efectiva e  $u$  a pressão intersticial num momento da consolidação. Tendo-se como pressão intersticial inicial após o carregamento  $u_i$ , então a tensão efectiva final  $\sigma'_1$  resulta da soma da tensão inicial  $\sigma'_0$  com a pressão intersticial  $u_i$ .

$$\sigma'_1 = \sigma'_0 + u_i = \sigma' + u$$

Resultando o grau de consolidação quando representado em função da pressão intersticial (Craig, R.F, 2004):

$$U_z = \frac{\sigma' - \sigma'_0}{\sigma'_1 - \sigma'_0} \Leftrightarrow U_z = \frac{\sigma'_1 - u - \sigma'_1 + u_i}{\sigma'_0 + u_i - \sigma'_0} \Leftrightarrow U_z = \frac{u_i - u}{u_i} = 1 - \frac{u}{u_i}$$

## 2.4 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONSOLIDAÇÃO $C_v$

### 2.4.1 Generalidades

O coeficiente de consolidação  $c_v$ , é o parâmetro que define o tempo de consolidação do solo e a sua determinação, resulta da solução da equação de Terzaghi, permite estimar a variação da pressão intersticial ou a variação do assentamento ao longo do tempo. O coeficiente de consolidação para cada patamar de carga determina-se através da leitura a tempos dos assentamentos, permitindo então estimar a evolução da consolidação.

Em grande parte dos estudos do solo elaboram-se gráficos de assentamento ao longo do tempo. A determinação do  $c_v$  nestes casos pode realizar-se através de um de dois métodos (Budhu, M, 2007):

método de Casagrande;

método de Taylor;

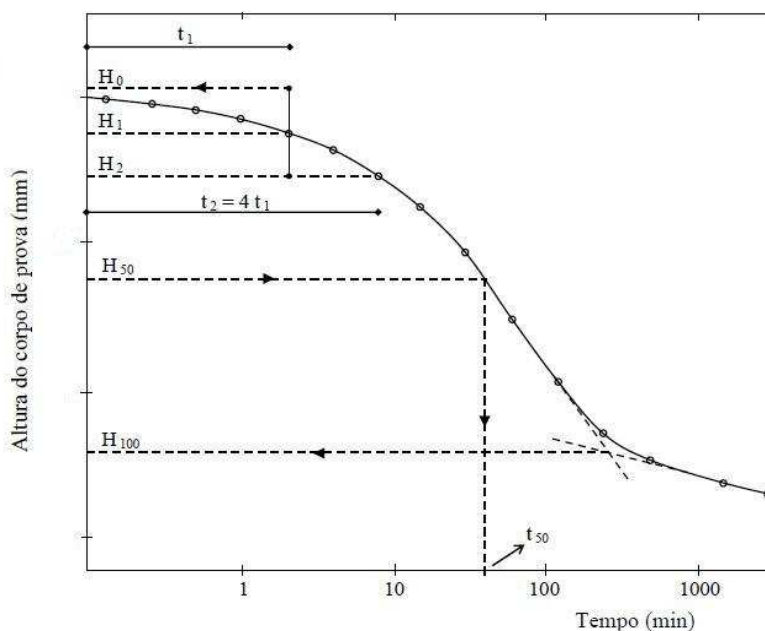
Todavia ao longo da dissertação utiliza-se também um método adicional, apresentado na norma British Standard 1377 e cuja fundamentação do mesmo se apresenta neste subcapítulo com a designação de, “O método da dissipação da pressão intersticial”.

Apesar de usuais apresentam-se mais em pormenor tanto o método de Casagrande, como o método de Taylor, pois vão ser utilizados no estudo experimental. Apresenta-se igualmente o método da dissipação da pressão intersticial não só por vir a ser utilizado posteriormente, mas também por ser parte integrante da norma BS 1377, para a qual se pretende verificar a aplicabilidade no ensaio de consolidação na célula de Rowe.

## 2.4.2 O método de Casagrande

No método de Casagrande as leituras dos assentamentos são apresentadas em função do logaritmo do tempo, pelo que a avaliação do  $c_v$  para cada patamar de carga é também conhecido como o método logaritmico.

Na Figura 2.7 apresenta-se o gráfico que normalmente resulta do ensaio de consolidação. O procedimento para a determinação do  $c_v$  baseia-se no gráfico apresentado e numa série de passos (Fernandes, M.M, 1994):



**Figura 2.7 – Gráfico para determinação de  $c_v$  no método de Casagrande (adaptado de Fernandes, M.M., 1994)**

Projectam-se as duas tangentes ao diagrama, a tangente superior retira-se do ponto de inflexão da curva. A ordenada do ponto de intersecção corresponde ao assentamento final  $\Delta h_{100} = H_{100} - H_0$ , ou seja o fim da consolidação ( $\bar{U}_z = 100\%$ )

Deve corrigir-se a fase inicial da curva para que se determine o assentamento  $\Delta h_i$  correspondente ao início da consolidação ( $\bar{U}_z=0$ ). Esta correcção resulta da necessidade de aproximar a curva do assentamento experimental à curva de consolidação teórica. Pois por vezes o assentamento resultante deve-se à compressão de ar aprisionado entre a amostra e o resto do sistema de ensaio.

Para se proceder à correcção devem-se seleccionar-se dois instantes iniciais  $t_1$  e  $t_2$ , onde  $t_2 = 4t_1$ , isto porque para um grau de consolidação  $\bar{U}_z < 60\%$ , o grau de consolidação é praticamente proporcional à raiz quadrada de  $t$ . Então o valor corrigido  $H_0$  resulta marcando-se uma distância igual à de  $H_1$  para  $H_2$  acima de  $H_1$ . Os assentamentos  $\Delta h_1$  e  $\Delta h_2$  são ambos determinados em relação a  $H_0$ ,  $\Delta h_1 = H_1 - H_0$  e  $\Delta h_2 = H_2 - H_0$ .

Determina-se o assentamento  $\Delta h_{50} = H_{50} - H_0$  e a ordenada  $t_{50}$  em minutos. Sabendo-se que para  $\bar{U}_z = 50\%$ , o valor teórico de  $T_v$  vale 0,197, a altura corrigida do provete em cm no início do patamar de carga é  $H_0$ , e que  $d$  representa o comprimento de drenagem do provete em cm, que é igual a metade da altura corrigida do provete no início de cada patamar de carga.

Determina-se então o valor de  $c_v$  ( $\text{cm}^2/\text{min}$ ):

$$c_v = \frac{T_v \times d^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times d^2}{t_{50}}$$

Por fim deve ter-se em atenção que a curva experimental ultrapassa o valor de  $H_{100}$ , este facto deve-se à continuação do assentamento após o final da fase de consolidação.

### 2.4.3 O método de Taylor

No método de Taylor os assentamentos são apresentados em função da raiz quadrada do tempo, pelo que a avaliação do  $c_v$  para cada patamar de carga denomina-se por vezes de método escalar.

Na Figura 2.8 apresenta-se o gráfico que normalmente resulta do ensaio de consolidação. O procedimento para a determinação do  $c_v$  baseia-se no gráfico apresentado e numa série de passos (Budhu, M, 2007):

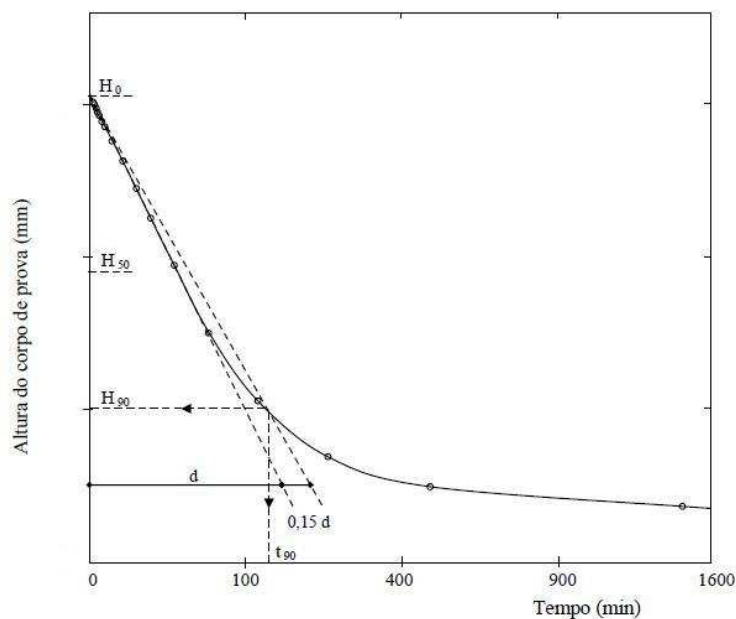


Figura 2.8 – Gráfico para a determinação de  $c_v$  no método de Taylor (adaptado de Budhu, M., 2007)

Deve prolongar-se a parte recta da curva até que esta intersecte o eixo das ordenadas, definindo-se esta intersecção como o ponto  $H_0$ .

Traça-se de seguida uma recta a partir de  $H_0$  com inclinação 1/1,15 vezes a inclinação da recta inicial. Quando a recta intersectar a curva laboratorial o ponto é  $(\Delta h_{90}; t_{90})$ , sendo  $\Delta h_{90} = H_{90} - H_0$ .

Sabe-se que para  $\bar{U}_z = 90\%$ , o valor teórico de  $T_v$  vale 0,848 conhece-se a altura corrigida do provete  $H_0$  em cm, e  $d$  representa o comprimento de drenagem no provete, em cm, que é metade da altura corrigida provete no início de cada patamar de carga.

Determina-se então o valor de  $c_v$  [ $\text{cm}^2/\text{min.}$ ]:

$$c_v = \frac{T_v \times d^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times d^2}{t_{90}}$$

Deve ter-se presente que este método se baseia no comportamento real e teórico, tentando compensar a diferença entre ambos. A correcção inicial realizada resulta do facto de poder existir ar na amostra devido à redução da pressão intersticial “*in situ*”. O assentamento após  $H_{90}$  continua, este facto está relacionado com o rearranjo das partículas do solo com o tempo, sendo também devido às propriedades tensão-deformação do mesmo (Craig, R.F, 2004).

Uma vez que o  $c_v$  varia com o nível de tensão, de incremento para incremento têm-se um  $c_v$ . Por isso o valor do mesmo deve ser adoptado para os níveis de tensão previsíveis no problema.

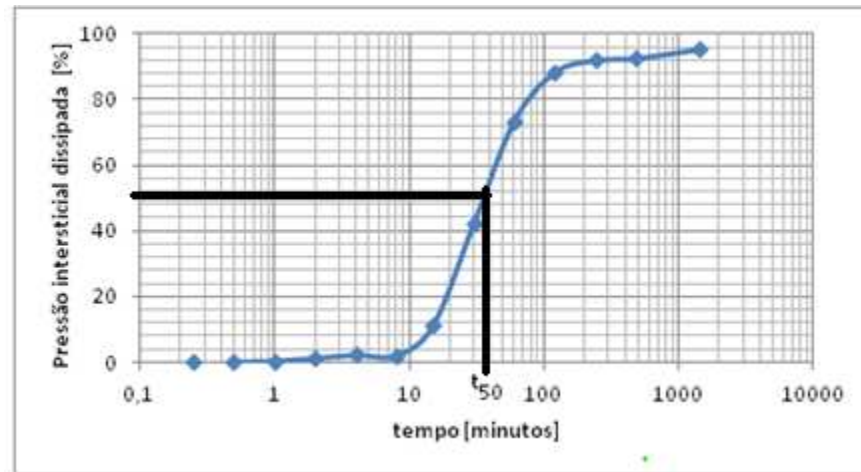
O método de Casagrande e o método de Taylor possuem algumas lacunas: o primeiro não consegue ter em conta as leituras realizadas na fase final do ensaio, o método de Casagrande, por sua vez não têm em consideração a leitura inicial, o que conduz a erros na curva geral (Shah, D. et Shroff, A., 2003).

Os resultados obtidos através do método de Taylor para determinação do  $c_v$  são usualmente inferiores aos assentamentos provocados por uma estrutura. Estes resultados estão relacionados com a dificuldade de avaliação do  $c_v$  (Mineiro, 1978). Todavia o método de Casagrande oferece resultados um pouco superiores aos do método de Taylor, apesar de serem da mesma ordem de grandeza (Bowless, J.E, 1996), logo mais próximos dos provocados por uma estrutura.

#### 2.4.4 O método da dissipação da pressão intersticial

Para além do método de Taylor e do método de Casagrande para a determinação do  $c_v$  a “British Standard Methodos of test for Soils for civil engineering purposes”, Parte 6, “Consolidation and permeability tests in hydraulic cells and with pore pressure measurement”, apresenta um outro método, o método da dissipação da pressão intersticial.

Este método baseia-se na dissipação da pressão intersticial, onde se apresenta o gráfico da percentagem da pressão intersticial dissipada em função do logaritmo do tempo para cada patamar de carga, Figura 2.9



**Figura 2.9 – Gráfico para a determinação de  $c_v$  no método da dissipação da pressão intersticial**

Deve então definir-se o ponto correspondente a 50% da dissipação, determinando-se o tempo correspondente  $t_{50}$ , em minutos, determina-se o valor do coeficiente de consolidação  $c_v$  em  $\text{cm}^2/\text{ano}$ :

$$C_v = \frac{0,2d^2}{t_{50}}$$

Em relação aos métodos apresentados anteriormente note-se a alteração relativamente ao comprimento de drenagem, pois neste método,  $d$  representa o comprimento de drenagem determinado através da média entre a altura do provete no início e no final da fase de consolidação, contrariamente aos métodos apresentados em 2.4.2 e 2.4.3 onde o comprimento de drenagem representa metade da altura corrigida do provete na fase de consolidação, este facto encontra-se relacionado com as características próprias do ensaio, no caso apresentado a drenagem realiza-se numa só direcção e em 2.4.2 e 2.4.3 a drenagem era realizada em ambos os sentidos.

De forma a poder comparar com os métodos referidos anteriormente o valor de  $c_v$  deverá ser convertido para  $\text{cm}^2/\text{min}$ .



### **3. ENSAIOS DE CONSOLIDAÇÃO**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Com o objectivo de superar a principal lacuna detectada no ensaio edométrico convencional, a demora na obtenção dos resultados, desenvolvem-se cada vez mais ensaios de consolidação que associados à aquisição e ao processamento automático de dados permitam uma realização de forma mais rápida e contínua.

Neste capítulo apresenta-se de forma sucinta o procedimento do ensaio edométrico com base nos conceitos teóricos apresentados no Capítulo 2. Faz-se um breve histórico relativo ao desenvolvimento da célula de consolidação e apresentam-se ainda as vantagens e desvantagens ao nível da drenagem e do carregamento, associados às células de consolidação que se utilizam hoje em dia, e que estão na base da célula apresentada no Capítulo 4.

Por fim apresenta-se uma breve síntese para cada um dos ensaios de consolidação especiais e tecem-se algumas considerações acerca do mesmo. Este desenvolvimento nos ensaios de consolidação só foi possível devido à evolução dos equipamentos, célula de consolidação, e aos avanços na electrónica e informática, que permitiram que, para além de mais rápidos os ensaios apresentem uma maior abrangência e eficiência na análise dos resultados.

#### **3.2 ENSAIO EDMÉTRICO**

O ensaio de consolidação edométrico, foi proposto por Terzaghi, tendo sido padronizado na década de 40 (Talyor 1942). Este ensaio consiste na aplicação de tensões crescentes a um provete confinado lateralmente e sujeito a uma carga axial, de forma a avaliar a variação de assentamentos no tempo e o assentamento total. Satura-se o provete para que se simulem as piores condições a que se pode encontrar submetido. A água drena através das placas porosas colocadas na face superior e inferior do provete. Usualmente, admite-se um tempo mínimo de 24 horas entre cada incremento de tensão no corpo de prova. Este período de espera encontra-se relacionado com o tempo que a pressão intersticial leva a ser dissipada, ou seja o tempo que dura a fase de consolidação para o estado de tensão que se aplicou, e faz com que o ensaio dure aproximadamente duas semanas em função do número de incrementos de tensão utilizados.

Até aos dias que correm o ensaio não sofreu grandes alterações, quer nos procedimentos experimentais, quer nos métodos de análise, os quais se encontram já padronizados na grande maioria dos países. A metodologia bem definida na interpretação de resultados, bem como a simplicidade de execução torna o ensaio ainda muito utilizado na actualidade (Carvalho, S. 1989).

#### **3.3 HISTÓRICO DA CÉLULA DE CONSOLIDAÇÃO**

##### **3.3.1 Evolução histórica**

Após a apresentação do ensaio de consolidação convencional apresenta-se a evolução da célula de consolidação ao longo dos anos, ao nível dos materiais bem como das funcionalidades.

A primeira célula de consolidação foi utilizada em 1910 por Fontard (Skempton, 1963), a célula consistia num recipiente em metal com uma base perfurada onde era colocado um provete com 5 cm de espessura e 35,5 cm de diâmetro, que era carregado através de um pistão.

Pode definir-se 1919 como um ano de grande desenvolvimento no que às células de consolidação diz respeito. A comissão sueca de geotecnia utilizou uma célula, onde se colocou o provete de argila no interior de um cilindro fechado sendo o carregamento aplicado através de um êmbolo ao longo de uma camada de areia.

No mesmo ano para o estudo dos princípios da tensão efectiva, Terzaghi concebeu uma célula de drenagem a que deu o nome de edómetro. Os provetes possuíam um diâmetro de 7,5 cm e uma espessura de 1,2 cm. Com o desenvolvimento do edómetro procedeu-se pela primeira vez à medição de forma precisa do assentamento em provetes de espessura fina. Terzaghi desenvolveu também um extensómetro com base no deslocamento do anel existente entre as duas placas paralelas (Casagrande 1960). A introdução em cada extremidade do provete de uma fronteira permeável permitiu não só a determinação da permeabilidade, como também a confirmação das bases da sua teoria da consolidação (Skempton 1963).

Alguns melhoramentos no que diz respeito ao método de carregamento, medição do assentamento e amostragem foram efectuados na década de 30. Com base nos trabalhos de Casagrande em argilas marinhas, onde se mostrava a necessidade de ensaiar amostras intactas, modificou-se então o edómetro permitindo que o anel de contenção fosse separado da restante célula e usado para diferentes amostras.

Salienta-se ainda nesta década o início da utilização de discos porosos para drenagem, aperfeiçoando-se também o sistema de aplicação da carga tornando-o contrabalançado. A fricção entre o provete e o material, bem como a quantidade de material que era perdido, diminuiu ao introduzir-se uma cobertura de borracha e um anel flutuante, respectivamente (Rowe, P.W, 1966).

Posteriormente, desenvolveram-se mecanismos com o objectivo de diminuir o atrito lateral, diminuição conseguida através da introdução de revestimento com graxa de silicone ou Teflon nos anéis interiores (Girault, 1961).

A primeira medição da pressão intersticial na célula de consolidação data de 1942, tendo sido realizada por Taylor, que utilizou um sistema de balanceamento ligado à base do provete; em 1951 a técnica foi repetida por Aldrich tendo-se utilizando uma agulha no plano médio do provete. A utilização da célula triaxial para o ensaio de consolidação tornou-se usual desde 1957 com o desenvolvimento da medição da pressão intersticial no ensaio triaxial, o que levou a que metodologia desenvolvida por Taylor passasse a ser menos utilizada (Bishop e Henkel, 1957).

As vantagens na utilização do transdutor eléctrico foram apresentadas por Whitman e Healy em 1961, período em que se iniciou o estudo do efeito que o sistema de medição tem nos resultados.

O estudo da influência da direcção para a qual a água drena iniciou-se na célula triaxial, sendo posteriormente alvo de estudo por Bishop e Henkel, bem como por Escario e Uriel (Escario e Uriel, 1961), através da colocação de drenos em torno do perímetro do provete em papel de filtro e areia respectivamente. Ainda em relação à drenagem, em 1959 Rowe estudou a drenagem radial interior no edómetro de Casagrande, utilizando um dreno de areia em conjunto com placas sólidas seladas com silicone ao longo do perímetro do provete, o estudo relativo à drenagem radial exterior foi realizado por McKinlay em 1961 através da utilização de um anel de aço inoxidável poroso em torno do provete.

Na década de sessenta o edómetro de Casagrande foi montado dentro de uma câmara de pressão de modo a permitir a aplicação de uma contrapressão (Lowe e Feldman, 1964). Apesar de tanto o modelo do teste de consolidação como o tamanho das amostras definidos por Terzaghi serem utilizados universalmente até aos dias de hoje, o edómetro de Casagrande apresenta ainda algumas

desvantagens. Todavia as alterações realizadas ao longo do tempo permitiram uma diminuição dos erros e consequente melhoria dos resultados.

Rowe, em 1954, aplicou por meio de uma pressão hidráulica uma carga uniforme através de uma membrana de borracha num provete de 25,4 cm de diâmetro o que fez com que a parte superior da mesma fosse selada. Posteriormente, alterou-se a forma da célula ao longo do perímetro para circinal, o que permitiu maiores deflexões em testes com argilas normalmente consolidadas em células de consolidação de tamanho superior com dreno de areia (Rowe e Shields, 1965).

Após algumas modificações mais pormenorizadas surge na Universidade de Manchester a célula de consolidação, utilizada em testes associados a tensão unidimensional. Esta célula é a base da célula ainda existente nos dias de hoje denominada de célula de Rowe.

Apresentam-se as vantagens associadas à mesma, bem como as condições de drenagem e as diferentes modalidades de carregamento que se podem aplicar no provete quando se utiliza a célula de Rowe. No Capítulo 4 realiza-se o estudo detalhado da célula existente no laboratório de mecânica dos solos do DEC.

### 3.3.2 Vantagens e desvantagens da célula de Rowe

Após a apresentação da evolução histórica da célula de consolidação apresentam-se as vantagens e desvantagens associadas às diferentes condições de drenagem e carregamento possíveis de executar na célula de Rowe.

Na célula de Rowe apresentada na Figura 3.1 a aplicação de cargas e descargas realiza-se hidráulicamente, através da pressão da água sobre uma membrana flexível. A utilização desta célula permite a deformação e consolidação de provetes de maior diâmetro, e aumentar a zona imperturbada. A possibilidade de medir a pressão intersticial, bem como a capacidade de controlar a drenagem ao longo de todo o ensaio de consolidação, com o auxílio das válvulas existentes na mesma, são os melhoramentos significativos comparativamente ao ensaio no edómetro convencional.

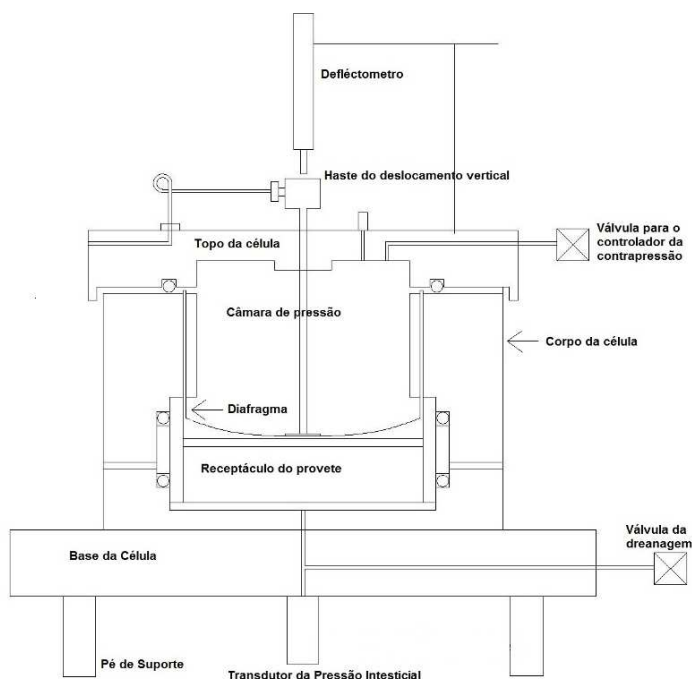


Figura 3.1 – Esquematização da célula de Rowe utilizada (Head, 1986)

As principais vantagens da célula de Rowe relativamente aos edométricos convencionais (Head, 1986) estão relacionadas com:

- a possibilidade de efectuar o ensaio em provetes de maior dimensão para que a análise dos assentamentos seja o mais próxima da realidade possível;

- o facto de o provete ser menos susceptível aos efeitos da vibração, que um sistema de carga por alavanca produz e que são incómodos em ensaios de deformação a longo prazo;

- a variação e controlo das condições de carregamento consoante o tipo de ensaio que se pretender executar, possibilidade de controlar as condições de drenagem no provete;

- a saturação do provete pode realizar-se aplicando contrapressão para que, antes de se iniciar a consolidação estejamos nas condições *in situ* mais desfavoráveis;

- poder desprezar-se os erros de leitura de assentamentos, causados por deformações do sistema de carga e a pressão intersticial poder ser medida a qualquer momento, tal como o volume de água saído do provete e os assentamentos;

Uma das vantagens da célula de Rowe, é a possibilidade de definir tanto as condições de aplicação de carregamento, como as condições de drenagem. Assim, apresentam-se 8 combinações na célula para a realização de ensaios, em que variam as condições de aplicação do carregamento, e de drenagem escolhidas, independentes do software que se venha a utilizar.

Apresentam-se na Figura 3.2 as diferentes modalidades para o ensaio na célula de Rowe.

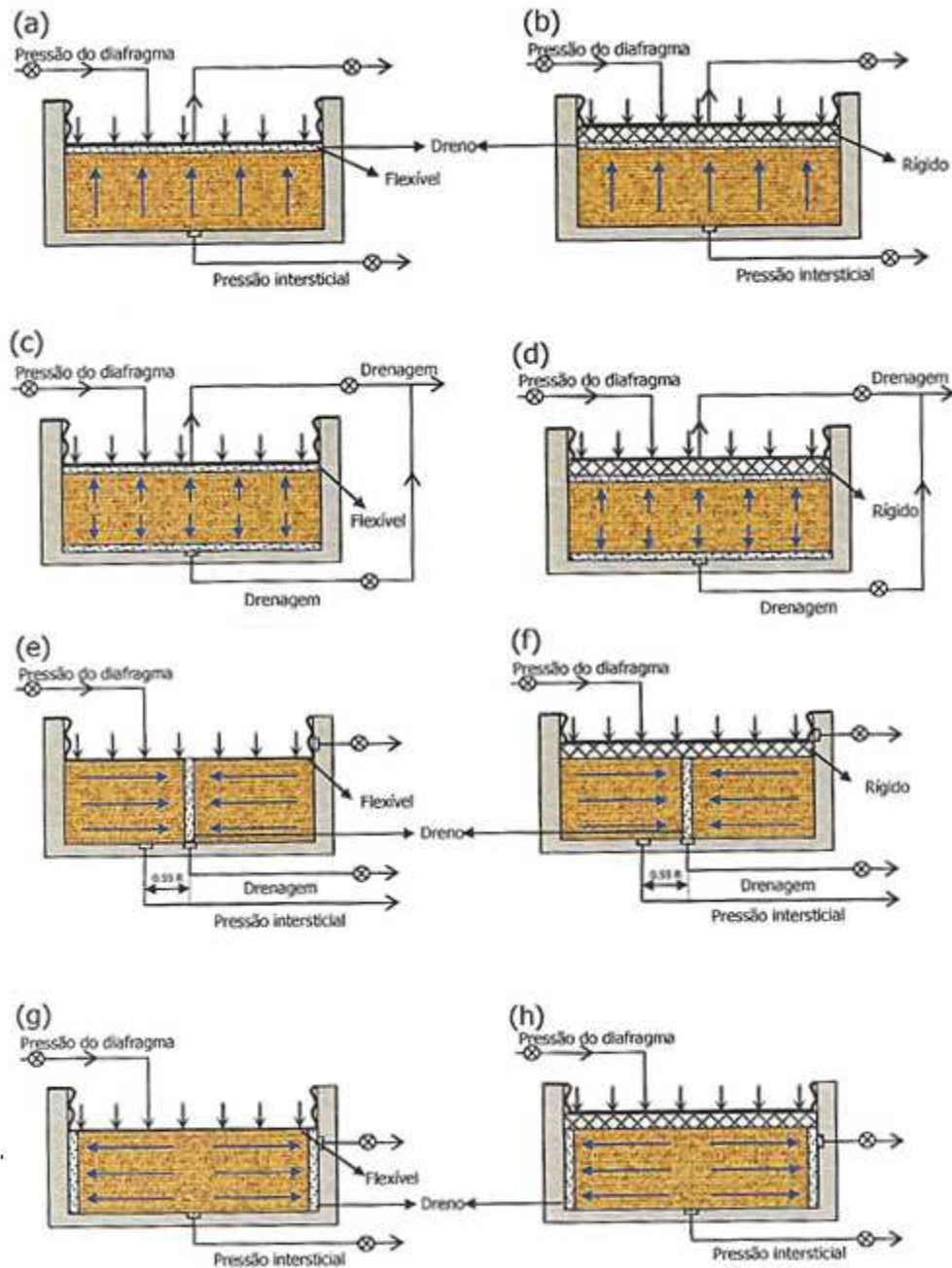
Sendo que a Figura 3.2 a) representa o ensaio para pressão uniforme com drenagem vertical simples, este modelo de ensaio é o mais indicado para a determinação de  $c_v$  (Head 1986).

A Figura 3.2 b) apresenta o ensaio de deformação uniforme com drenagem vertical simples; esta modalidade de ensaio na célula de Rowe é a que mais se aproxima ao edómetro convencional (Head 1986). A Figura 3.2 c) apresenta o ensaio de pressão uniforme com drenagem vertical dupla, sem medição de pressão intersticial.

A Figura 3.2 d) apresenta o ensaio de deformação uniforme com drenagem vertical dupla, sem medição de pressão intersticial. A Figura 3.2 e) apresenta o ensaio a pressão uniforme com drenagem radial central sem medição de pressão intersticial. Neste ensaio necessita-se que a célula de Rowe esteja equipada com um dreno central de areia (ou outro material de características drenantes semelhantes) que contacta com a placa porosa no centro da base do provete. Não é permitida qualquer drenagem vertical.

O ensaio a deformação uniforme com drenagem radial central representa-se na Figura 3.2 f). Nesta modalidade também é necessária a existência de um dreno central de areia, sendo que neste ensaio é associada uma placa rígida impermeável ao diafragma. Na Figura 3.2 g) apresenta-se o ensaio de pressão uniforme com drenagem radial periférica. Este tipo de ensaio requer uma célula de Rowe com dreno lateral em torno do provete, o qual contacta posteriormente com um dreno localizado junto do diafragma.

Na Figura 3.2 h) apresenta-se a modalidade mais indicada para determinar o valor de  $c_h$ , o ensaio de deformação uniforme com drenagem para as paredes da célula (Head, 1986). Em ensaios de deformação uniforme uma placa rígida com um furo para a drenagem central, que quando necessário pode ser obstruído, deve ser colocada entre o diafragma e o disco de bronze.



**Figura 3.2 – Diferentes combinações na célula de Rowe (adaptado de Head, 1986)**

No entanto, nem tudo são vantagens na célula de Rowe, pois existem algumas desvantagens apontadas à mesma (Khan e Garga, 1994) tais como:

existe a possibilidade de a água ou o ar ficarem retidos entre a célula e o diafragma, podendo ser expelidos durante a consolidação o que fará com que as leituras da variação do volume possam apresentar valores incorrectos;

a força aplicada pelo diafragma pode diferir consideravelmente da que se pretende aplicar ao provete, podendo atingir uma discrepância de valores na ordem dos 15 a 20 %.

Existem ainda algumas desvantagens na utilização da célula de Rowe, relacionadas com o “fabric” (Blewett, 2002). Pois a colocação do diafragma no topo do provete pode provocar perturbações no

topo da mesma, na obtenção de uma superfície para o carregamento inicial, onde devido à falta de rigidez do diafragma não se garante que a carga seja aplicada horizontalmente, mesmo utilizando uma placa adicional, principalmente se existir atrito lateral entre as paredes da célula e o diafragma.

### 3.4 ENSAIOS DE CONSOLIDAÇÃO ESPECIAIS

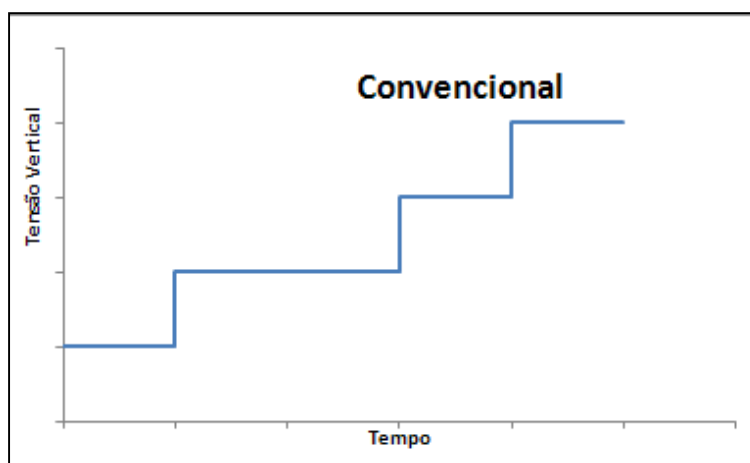
#### 3.4.1 Descrição geral

Após a apresentação do ensaio edométrico convencional, da evolução da célula de consolidação e das vantagens da célula de Rowe utilizada nos dias que correm, apresentam-se de seguida os ensaios de consolidação especiais.

Nos ensaios de consolidação especiais as tensões são aumentadas ininterruptamente, o que permite que os ensaios não durem mais que alguns dias (por vezes não demoram mais que algumas horas) e representem de forma fidedigna os parâmetros de consolidação. Algumas das diferenças entre os ensaios de consolidação especiais e o ensaio edométrico convencional estão na aplicação das tensões, e monitorização da pressão intersticial ao longo de todo o ensaio. A teoria de Terzaghi apresentada no Capítulo 2 está na base das equações para análise e interpretação dos resultados dos ensaios de consolidação especiais.

Os ensaios de consolidação especiais realizam-se em equipamentos diferentes dos equipamentos tradicionais, desde logo a célula de consolidação, pois a drenagem deve ocorrer apenas na parte superior do provete, sendo a extremidade inferior do provete utilizada para monitorização da pressão intersticial. Outra alteração prende-se com o tamanho do provete sendo necessário que o mesmo se enquadre nas dimensões da nova célula de consolidação (Carvalho, S. 1989).

Apresenta-se de seguida na Figura 3.3, o andamento característico do ensaio edométrico convencional com aplicação de carga incremental.



**Figura 3.3 – Andamento característico da tensão vertical para o ensaio edométrico convencional**

Na literatura existem diversos tipos de ensaios de consolidação especiais, alguns dos ensaios mais comuns juntamente com os seus padrões característicos de carregamento são apresentados de seguida.

### 3.4.2 Ensaio de consolidação com gradiente de pressão intersticial constante (CG)

Na Figura 3.4 representa-se o ensaio de consolidação com gradiente de pressão intersticial constante, (“Constant Pore Pressure Gradient” - CG), neste ensaio mantêm-se constantes, ao longo do tempo, a diferença entre a pressão intersticial existente no topo do provete e a apresentada na base do mesmo.

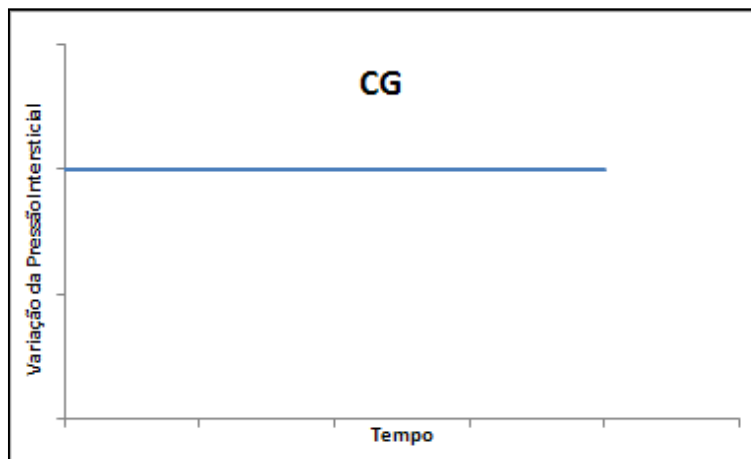


Figura 3.4 – Representação do ensaio de consolidação com gradiente de pressão intersticial constante

Trata-se de um dos ensaios especiais mais divulgados, o seu desenvolvimento remonta ao final da década de 60 (Lowe *et al.*, 1969). Os principais objectivos a que se propuseram com este ensaio foram ter uma velocidade de ensaio baixa o suficiente para que se possa ajustá-la com facilidade quando se pretende manter constante o gradiente de pressão intersticial na base, e para que a extrapolação para a realidade se torne mais simples. Os autores solucionaram ainda as equações diferenciais necessárias à interpretação do ensaio, em que ultrapassada a fase a curto prazo, as equações diferenciais obtidas para o ensaio são idênticas às do ensaio de consolidação com velocidade de deformação constante, (Constant Rate of Strain - CRS).

Quando se inicia o ensaio de consolidação com gradiente de pressão intersticial constante (CG), é aplicada uma tensão vertical  $\sigma_v$  que vai permitir a dissipação da pressão intersticial gerada na base  $u_b$  até que se alcance o valor pretendido para o ensaio. Após o alcance do valor pretendido, a tensão vertical é incrementada para que se mantenha constante o valor de  $u_b$ .

A pressão intersticial na base do provete não deve ultrapassar o valor de 50% da tensão vertical total  $\sigma_v$  aplicada no provete (Gorman *et al.*, 1978), todavia esse valor também não deve ser inferior a 7 kPa. Lowe *et al.* (1969), Salfors (1975), Gorman *et al.* (1978), Leroueil *et al.* (1985), Silvestrini *et al.* (1986), entre outros também publicaram trabalhos relacionados com o ensaio CG. Para a grande parte destes autores algumas notas podem ser apresentadas:

A pressão intersticial e os gradientes hidráulicos gerados são significativamente inferiores aos do ensaio edométrico convencional. A variação dos valores de pressão intersticial na base do provete permitem verificar a influência da variação da velocidade de deformação na consolidação do solo;

O ensaio de consolidação CG, permite fornecer dados importantes sobre a consolidação primária e secundária. As velocidades de deformação vertical especificadas são baixas, porém superiores às encontradas no campo.

### 3.4.3 Ensaio de consolidação com fluxo restringido (RFC)

Na Figura 3.5 está apresentado o ensaio de consolidação com fluxo restringido, (Restricted Flow Consolidation - RFC), onde a velocidade de drenagem é controlada através de um utensílio que restringe o fluxo, de modo a que a diferença de pressão intersticial nas duas faces permaneça constante ao longo de todo o ensaio.

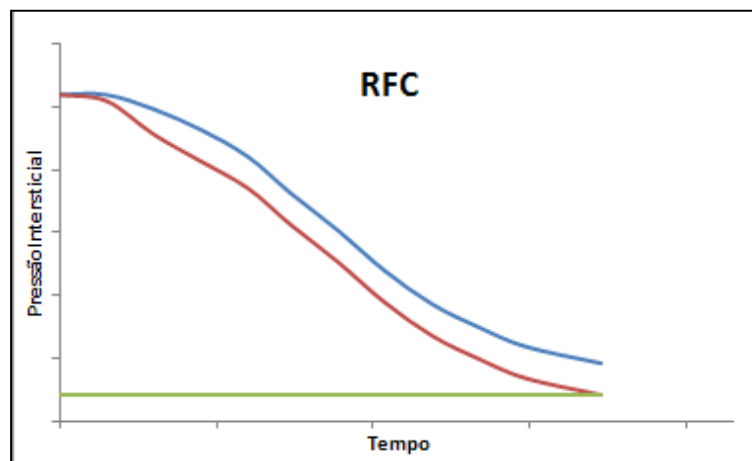


Figura 3.5 – Representação do ensaio de consolidação com fluxo restringido

O ensaio de consolidação com fluxo restringido idealizado por Lee em 1977, possui como princípio básico a aplicação de uma tensão vertical ( $\sigma_v$ ), de uma só vez num provete onde a face drenante está ligada a um dispositivo que restrinja o fluxo de água ao longo do ensaio (Sills *et al.* 1986).

O equipamento utilizado no ensaio pode ser o mesmo que o usado nos ensaios CG ou CRS, desde que seja monitorizada a pressão intersticial gerada em cada um dos lados do provete, ou seja devem ligar-se em ambos os lados transdutores de pressão. Para além da pressão intersticial, são ainda lidas a tensão vertical na base do provete e o deslocamento vertical no topo.

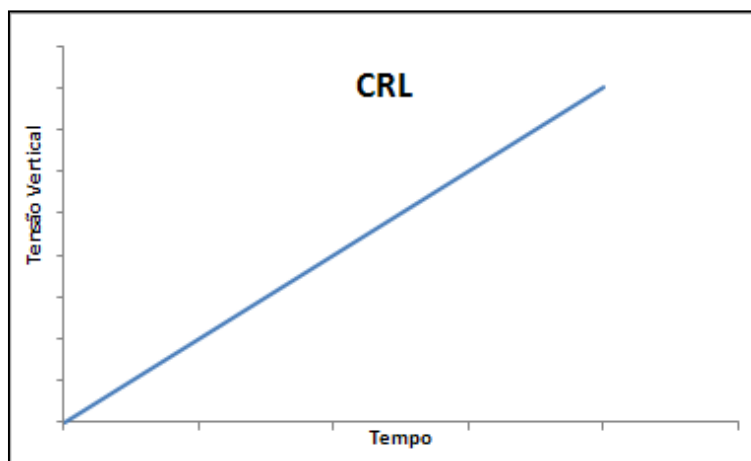
Nota ainda para o facto de a qualidade dos resultados obtidos no ensaio RFC estar relacionada directamente com a eficiência do utensílio que restringe o fluxo; o facto de o equipamento utilizado não necessitar de realimentação faz com que o custo de implementação deste tipo de ensaio de consolidação especial seja inferior ao custo apresentado pelos outros ensaios de consolidação especiais, todavia apresenta um custo superior ao do ensaio edométrico convencional. O facto de o número de discos a utilizar ter de ser compatível com o solo a ensaiar, para que a qualidade com que se restringe o fluxo seja garantida é um problema de solução complexa uma vez que não existem critérios bem definidos relativamente a este aspecto.

Por fim é salientar que diferentes níveis de tensão vertical efectiva podem ser obtidos, através da utilização de diferentes combinações de pressão intersticial e tensão total, aplicando-se a contrapressão ao longo do carregamento.

### 3.4.4 Ensaio de consolidação com velocidade constante de carregamento (CRL)

Na Figura 3.6 apresenta-se o ensaio de consolidação com velocidade constante de carregamento, (Constant Rate of Load - CRL), que consiste em aumentar a tensão vertical aplicada a velocidade constante com o tempo.





**Figura 3.6 – Representação do ensaio de consolidação com velocidade constante de carregamento**

O ensaio tem a sua génese teórica assente nos estudos realizados em 1970 (Aboshi *et al*, 1970), tendo-se considerado válidas as seguintes hipóteses:

a permeabilidade no provete é constante, bem como o coeficiente de consolidação, as deformações são infinitesimais e considera-se uma relação linear entre o índice de vazios e a tensão efectiva;

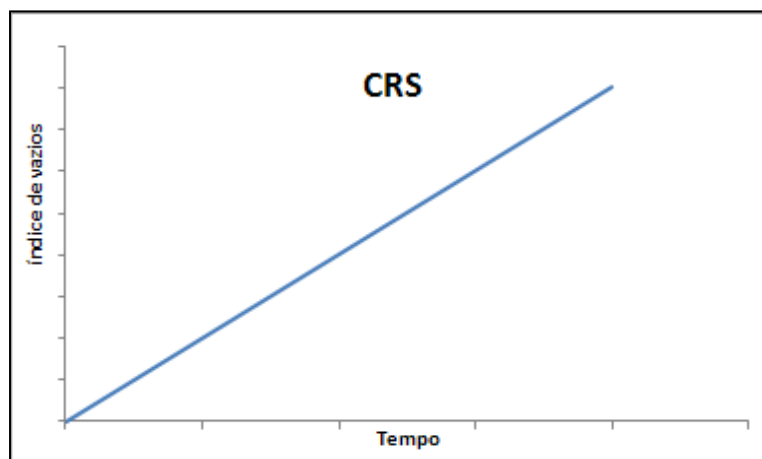
no ensaio de consolidação com velocidade constante de carregamento (CRL), a tensão vertical aplicada é aumentada a uma velocidade constante com o tempo, o que implica a utilização de um sistema de aplicação de tensão vertical mais sofisticado. Para o aumento constante da tensão vertical ao longo do tempo existem diversas formas de aplicação da carga: a aplicação a uma velocidade constante de pesos, num braço da célula do edométrico convencional, ou o equipamento utilizado pode ser o mesmo do ensaio CRS, com medições iguais às impostas ao ensaio;

fazendo-se uma análise directa de alguns aspectos referentes à execução do ensaio, pode concluir-se que as velocidades de carregamento utilizadas no ensaio CRL devem ser as menores possíveis, para que a distribuição da pressão intersticial seja a mais uniforme possível, variando entre 6 a 600 kPa por hora, (Burghignoli, 1979).

### **3.4.5 Ensaio de consolidação com taxa de deformação constante (CRS)**

Na Figura 3.7 apresenta-se o ensaio de consolidação com velocidade de deformação constante, (Constant Rate of Strain - CRS), neste ensaio a velocidade de deformação vertical é mantida constante durante todo o ensaio

O CRS foi desenvolvido com o objectivo de diminuir o tempo de obtenção da tensão de pré-consolidação de uma argila na América do Norte (Hamilton e Crawford, 1950). As velocidades de deformação vertical adoptadas no ensaio variaram entre 0,009 até 0,03 mm/minuto.



**Figura 3.7 – Representação do ensaio de consolidação com velocidade de deformação constante**

O trabalho teórico de Wissa *et al.* teve grande influência na padronização mundial do ensaio CRS que tem em conta deformações infinitesimais. Porém o pioneiro na fundamentação matemática do ensaio, Smith e Wahls (1969), propusera uma solução mais simplificada tendo em conta deformações finitas.

O ensaio de consolidação com taxa de deformação constante, CRS, define-se pela aplicação de uma tensão vertical no provete de solo a ensaiar, através do aumento do deslocamento axial a uma velocidade constante ao longo do tempo. Existe uma medição constante da pressão intersticial gerada na base do provete. A face inferior não é drenada, já a face superior apresenta drenagem livre, pelo que consequentemente a pressão intersticial no topo do provete manter-se-á sempre nula ou igual à contrapressão adoptada no ensaio.

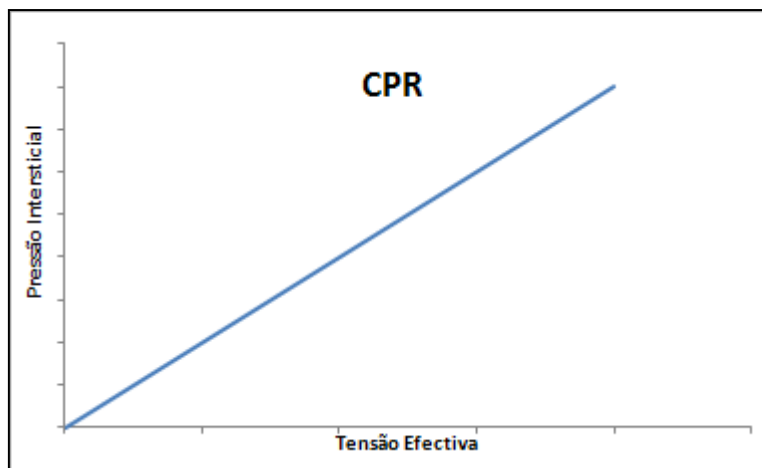
Ao longo do ensaio, são efectuadas leituras constantes do tempo decorrido, da tensão aplicada, da pressão intersticial na base e do deslocamento vertical no topo, para obtenção dos parâmetros de cálculo do ensaio, o que permite calcular todos os parâmetros de compressibilidade do solo.

Concluiu-se que as velocidades de deformação vertical mais altas, correspondentes aos maiores valores de tensão de pré-consolidação, estavam relacionadas com o menor tempo de dissipação da pressão intersticial gerada, resultante da maior velocidade adoptada no ensaio.

Apesar de ainda não existirem critérios bem definidos a escolha da velocidade do ensaio torna-se um ponto essencial a ser decidido, pois o ensaio possui um tempo de duração inferior ao gasto no ensaio edométrico convencional e obtêm-se resultados para o coeficiente de consolidação tão confiáveis como no ensaio convencional.

#### **3.4.6 Ensaio de consolidação com razão pressão intersticial/tensão aplicada constante (CPR)**

Na Figura 3.8 representa-se o ensaio de consolidação especial em que a razão entre a pressão intersticial e tensão aplicada é constante, (Constant Pressure Ratio - CPR), onde a tensão vertical é aplicada de modo a que a pressão intersticial na face não drenada  $u_c$  tenha sempre a mesma razão relativamente à tensão vertical aplicada  $\sigma_v$ .



**Figura 3.8 – Representação do ensaio de consolidação que a razão entre a pressão intersticial e a pressão aplicada é constante**

Proposto inicialmente por Janbu *et al* (1981) o ensaio de consolidação CPR caracteriza-se pela razão pressão intersticial/tensão aplicada que é representada por  $\lambda$ . O valor de  $\lambda$  nos ensaios CPR desenvolvidos pelo autor variam entre 0,2 e 0,7, aplicando-se para tal uma velocidade de deformação vertical de 5% por hora e 10% por hora em argilas de média a baixa plasticidade. Através da aplicação destas velocidades os ensaios duraram menos de uma hora. Todavia para outros autores a utilização de velocidades desta ordem de grandeza para solos argilosos com maior grau de plasticidade, iria levar a resultados insatisfatórios (Crawford, 1986).

Segundo os autores a vantagem da utilização do ensaio CPR prende-se com a possibilidade de estudar a influência da velocidade de aplicação de tensão vertical no valor da tensão de pré-consolidação.

Todavia em 1986, Olson referiu que sendo o CPR realizado com um  $\lambda$  constante e fluxo transiente as equações apresentadas por Janbu *et al* (1981) não apresentam validade, apontando ainda outras desvantagens para o ensaio CPR:

não existirem critérios nem formulações correctamente estabelecidas para uma definição dos valores de  $\lambda$  utilizados nos diversos ensaios de um mesmo material;

à excepção do ensaio RFC todos os outros ensaios de consolidação especiais apresentam como condicionantes a necessidade de se ter um sistema de processamento automático de dados e de realimentação, o que faz com que apresentem um custo superior ao do ensaio convencional.



## **4. CÉLULA DE ROWE E SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS EXISTENTES NO DEC**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Uma vez apresentados os princípios associados aos ensaios de consolidação, bem como a forma como a célula de Rowe se insere nos ensaios de consolidação especiais, pretende-se ao longo deste capítulo apresentar a célula de Rowe existente no laboratório de mecânica dos solos do DEC, através de uma descrição exaustiva da mesma, bem como dos seus componentes e acessórios.

Ao longo deste capítulo descreve-se também o equipamento auxiliar e de aquisição de dados utilizado para maximizar a performance da célula de Rowe, uma vez que é parte integrante da mesma no que concerne a tratamento de dados e resultados provenientes da célula.

Por fim, uma configuração geral do software utilizado é vista em pormenor, com o intuito de no final do capítulo existir já uma perfeita noção e contextualização da célula de Rowe e tudo o que a ela se encontra associado para a execução do estudo experimental a apresentar no Capítulo 5.

### **4.2 CÉLULA DE ROWE**

#### **4.2.1 Componentes e acessórios da célula de Rowe**

A célula de Rowe em alumínio existente no laboratório de mecânica de solos do DEC, apresentada na Figura 4.1 é constituída por três partes: a base, o corpo e o topo, representadas nas Figuras 4.2 e 4.3. A liga de alumínio que constitui a célula foi devidamente tratada para se eliminar a porosidade.



**Figura 4.1 – Célula de Rowe existente no laboratório do DEC**

A base da célula tem uma reentrância onde é colocado o “o-ring”, que têm como função selar a ligação entre a base e o corpo da célula. Existe também uma pequena reentrância no centro da base da célula, onde se encontra um disco que vai permitir a medição da pressão intersticial do provete através de um transdutor de pressão ligado a uma válvula.

O corpo da célula é oco e possui forma cilíndrica e fixa-se entre o topo e a base através de quatro longos parafusos Figura 4.2. O diafragma é formado por uma borracha existente no topo da célula. Tem a função de selagem da câmara de pressão, e aplica o carregamento vertical no provete através da pressão exercida pela água que se encontra no interior da mesma.



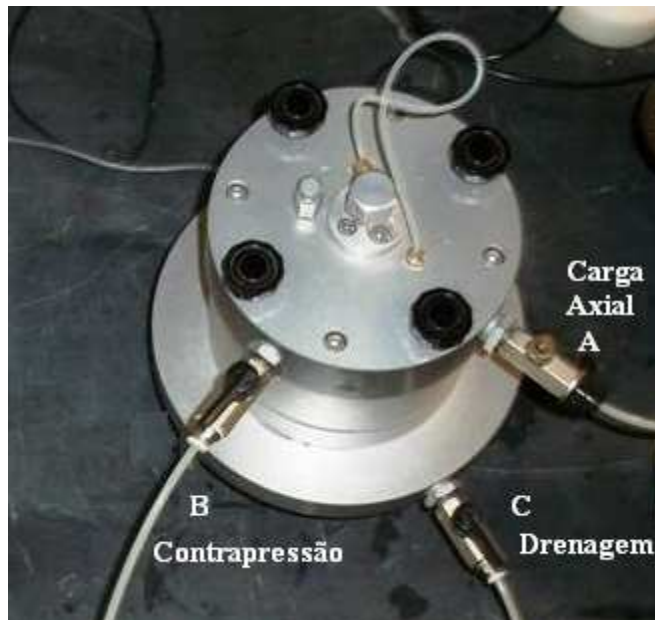
**Figura 4.2 – Base e corpo da célula de Rowe**

O topo da célula é constituído por dois orifícios, ambos ligados a controladores de pressão/volume. Existe um cilindro metálico acoplado ao topo, cuja superfície horizontal serve de referência para a medição do assentamento no provete, realizada pelo deflectómetro montado no suporte. Existe ainda uma purga para o ar no interior da câmara de pressão, obstruída por um parafuso, bem como por 4 parafusos que servem de fixação aos restantes constituintes da célula.



**Figura 4.3 – Topo da célula de Rowe**

Além dos orifícios existentes no topo da célula existe ainda um orifício na base que completa o sistema de válvulas da célula de Rowe, apresentadas na Figura 4.4. Os orifícios de entrada de água encontram-se ligados a controladores de pressão/volume, sendo que um permite aplicar um carregamento vertical ao provete, válvula A, e a válvula B transmite ao provete a contrapressão; por fim, o orifício drenante é controlado através de uma válvula que permite a drenagem ao longo do ensaio sempre que tal seja pretendido, válvula C.



**Figura 4.4 – Esquema de válvulas na célula de Rowe**

Existem diversos acessórios que podem ser utilizados em conjunto com a célula de Rowe:

dois discos porosos de bronze, um a ser colocado no topo do provete e o outro na base da célula de Rowe. Os discos utilizados em células de 75 mm podem ser considerados “rígidos”; todavia, para células de diâmetro nominal superior, os discos são de flexibilidade não desprezável. Existe ainda um disco de plástico poroso de 3 mm de espessura, para quando se pretende garantir que a pressão de carregamento na face superior do provete é aplicada de forma uniforme;

pode ainda integrar-se uma banda porosa com 1,5 mm de espessura, com o objectivo de se efectuar uma drenagem periférica do provete. Outra banda porosa só que com uma altura inferior a ser colocada junto da válvula existente no topo da célula pode ser utilizada. Em casos de drenagem exclusivamente radial utiliza-se também um disco em látex de espessura reduzida a ser colocado no topo do provete; existe ainda um anel que permite o uso de duas células em conjunto;

materiais consumíveis, como: pasta de silicone, uma banda de material poroso com espessura de 1,5 mm (para drenagem ao longo do perímetro do provete) e um disco com espessura de 3 mm (para drenagem axial), podem ser necessários dependendo do tipo de ensaio a realizar.

#### **4.2.2 Equipamento auxiliar**

Para a execução dos ensaios disponíveis na célula de Rowe é favorável utilizar-se equipamento auxiliar de aquisição de dados, os dispositivos auxiliares normalmente utilizados são:

Dois controladores de pressão/volume, que funcionam através de injeção de água sob pressão, um para aplicar a pressão na câmara e o outro para aplicar a contrapressão no provete. Estes

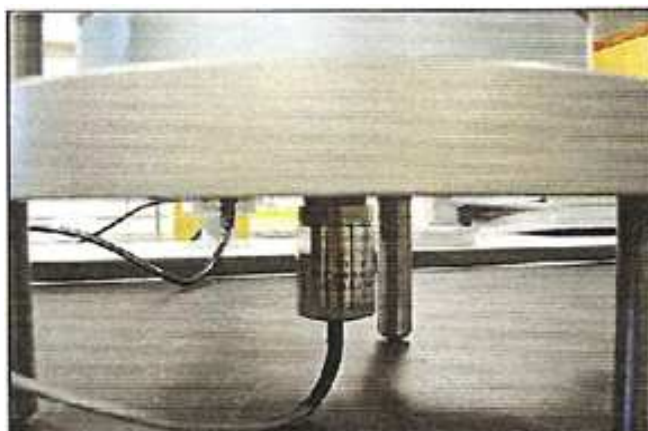


controladores possuem capacidade para atingirem pressões de 3000 kPa (Figura 4.5) encontrando-se ligados à célula de Rowe através das válvulas existentes na mesma.



**Figura 4.5 – Controladores de pressão**

Existe ainda um transdutor de pressão com o objectivo de determinar a pressão intersticial no provete (figura 4.6), e um outro transdutor com o intuito de medir o deslocamento vertical.



**Figura 4.6 – Transdutor da pressão intersticial**

Deve adquirir-se um cronómetro com incerteza máxima de um segundo, e um deflectómetro (Figura 4.7) para medir o assentamento vertical do provete.

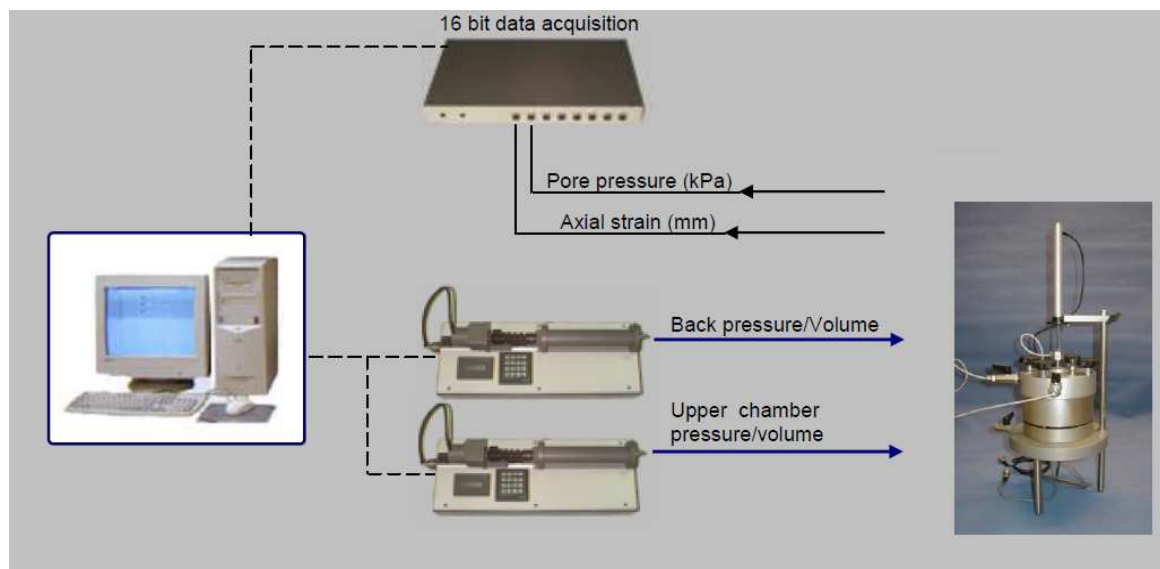




**Figura 4.7 – Deflectómetro**

A leitura dos instrumentos bem como a conversão dos dados realizou-se através de um sistema de aquisição automática de dados, de marca GDS RS 232-MUX. Este equipamento permite a leitura simultânea de até 8 canais de entrada analógicos de 16 bit, sendo que cada canal possui o seu próprio conversor. Se for necessário um número maior de canais de entrada, é possível conectar em série dois ou mais módulos. As leituras efectuadas pelo módulo são transferidas a um microcomputador através da porta paralela LPT1. Os dados são processados e apresentados no monitor pelo software GDSLab, que acompanha o equipamento.

Tanto os controladores como os transdutores encontram-se ligados a um computador através de uma interface digital denominada multiplexer como representado na Figura 4.8.



**Figura 4.8 – Sistema de aquisição automática de dados na célula de Rowe (GDS, 1992)**

### 4.3 SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS EXISTENTE NO DEC

#### 4.3.1 Descrição geral

A aquisição automática de dados foi feita através do programa de software existente no DEC, o GDSTLab. Através deste programa é possível configurar-se o tipo de instrumento a ser lido em cada canal, bem como determinar a escala de leituras e o intervalo de tempo entre leituras.

Procede-se de seguida a uma explicação mais detalhada da interface do programa:

Após seleccionados o formato e nome do ficheiro bem como a frequência de gravação do mesmo define-se a directoria de alocação do ficheiro.

Procede-se então à selecção do modo de ensaio, pois o software permite a realização de outros ensaios geotécnicos. Após seleccionar o ensaio de consolidação definem-se as características do provete através de uma interface que permite a introdução de dados como o diâmetro e altura inicial, bem como uma série de dados opcionais como apresentado Figura 4.9.

Figura 4.9 – Introdução das propriedades do provete no GDSTLab

A escolha do tipo de ensaio deve respeitar o objectivo do estudo que se pretende implementar na célula de Rowe. No software GDSTLab para ensaios de consolidação existem as seguintes opções de ensaio: “Constant Rate of Back Volume”, “Constant Rate of Load”, “Constant Rate of Strain”, “Constant Stress” e o “Stepped Loading”.

Apresentam-se de seguida as características das diferentes opções de ensaio no software.

Quando se executa a modalidade “Constant Rate of Back Volume” o ensaio realiza-se mantendo constante a contrapressão, definindo-se o volume por meio de uma rampa.

Relativamente ao módulo “Constant Rate of Strain”, (CRStrain), apresentado no software, permite-se nesta modalidade a realização do ensaio mantendo a contrapressão constante, definindo-se a deformação axial por meio de uma rampa. A velocidade de desenvolvimento do ensaio mantém-se constante de acordo com o definido pelo operador, pelo que caso ocorra qualquer oscilação o software restabelecerá a velocidade previamente estabelecida.

O módulo “Constant Rate of Load”, (CRLoad), funciona de forma idêntica ao CRStrain, sendo que neste caso a rampa define a carga axial e não a deformação axial. Neste caso o software apresenta tanto a carga axial e a contrapressão a que o provete está sujeito como a que se pretende atingir, o

tempo para terminar o ensaio e o gradiente hidráulico máximo caso especificado são também apresentados.

As modalidades de ensaios CRLoad e CRStrain existentes no software do DEC, são como que as modalidades mais indicadas quando se pretende realizar os ensaios de consolidação especiais apresentados no subcapítulo 3.4.4 e 3.4.5, respectivamente.

Quando se utiliza a opção de ensaio “Stepped Loading”, torna-se possível aumentar a carga axial no provete, mantendo constante a contrapressão e medindo a variação do volume. Por fim ao utilizar-se o “Constant Stress” realiza-se o ensaio mantendo-se constantes ao longo do tempo tanto a tensão axial como a contrapressão. O software neste caso apresenta, a tensão axial e contrapressão actuais bem como as que se pretendem atingir definidas pelo utilizador.

Durante todo o ensaio os dados são automaticamente adquiridos, o software permite que a qualquer altura do ensaio se verifiquem os valores a que o provete se encontra sujeito, através de um ambiente de trabalho (Figura 4.10) onde se encontram disponíveis a pressão intersticial, o deslocamento axial, a contrapressão bem como a pressão na câmara. Durante todo o ensaio o software permite ainda aceder a uma série de gráficos.

O tratamento dos dados matemáticos resultantes da aquisição de dados realiza-se normalmente através de um ficheiro em formato Excel.

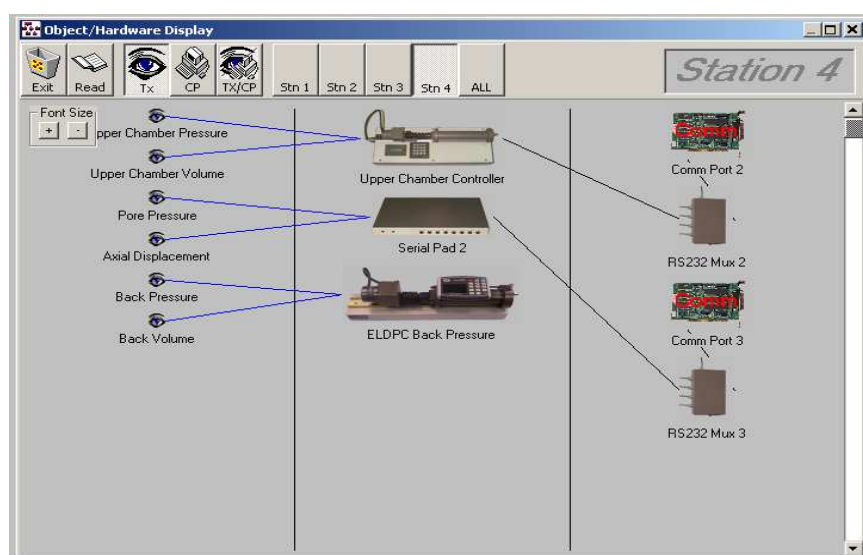
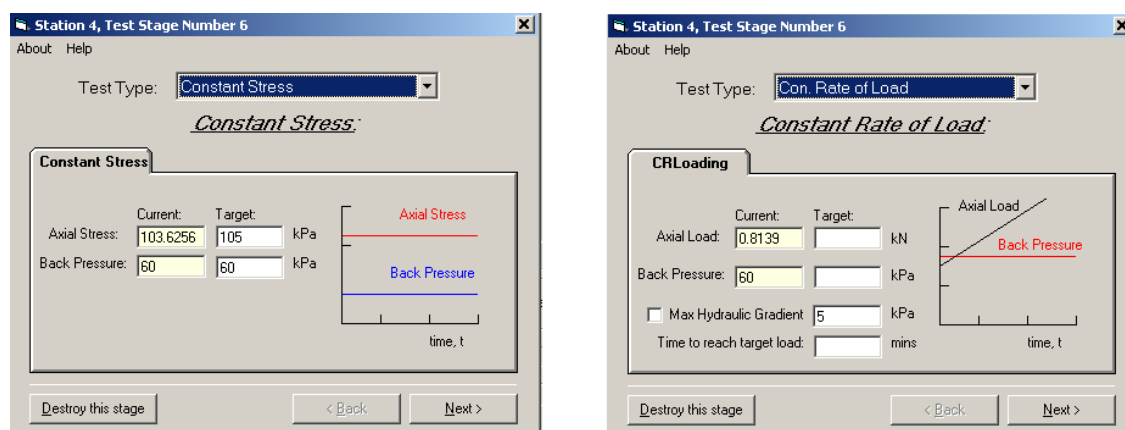


Figura 4.10 – Ambiente de trabalho do Software GDSLab

#### 4.3.2 Módulos de software adoptados no estudo experimental

Como se pretende estudar a consolidação com recurso à célula de Rowe, e comparar com os ensaios edométricos, foi necessário seleccionar-se qual a modalidade de ensaio existente no software que melhor se adequa à realização do estudo pretendido.

Na Figura 4.11 apresentam-se os dois módulos do software utilizados ao longo do ensaio de consolidação na célula de Rowe, a apresentar no estudo experimental.



**Figura 4.11 – Exemplo de dois tipos de ensaio disponíveis no software para a consolidação**

O módulo Constant Stress foi utilizado tanto na fase de saturação do provete, como na consolidação, já o CRLoad apenas se utilizou para a fase de saturação do provete.

A interface do módulo Constant Stress, para além de apresentar os valores e o gráfico com o comportamento da tensão na câmara e da contrapressão ao longo do tempo, permite ao utilizador definir o valor que pretende atingir no patamar seguinte.

A interface do módulo CRLoad é idêntica à do Constant Stress, sendo no entanto necessário inserir em quanto tempo se pretende atingir o valor da carga axial inserido em kN, ao longo do tempo a carga axial apresenta um crescimento no tempo, ao invés de ser constante como a tensão na câmara.

Como referido anteriormente para a saturação do provete utilizam-se ambos os módulos, no CRLoad após inserido o tempo ao fim do qual se pretende atingir o acréscimo de carga axial definido, deve aguardar-se que a pressão intersticial estabilize. Realizam-se os cálculos associados à determinação do grau de saturação, caso o provete não esteja ainda saturado, procede-se ao incremento da tensão na câmara e da contrapressão utilizando o módulo Constant Stress ficando o provete sujeito a estas condições durante 24 horas, após as quais se volta a utilizar o módulo CRLoad. Assim que o provete se encontre saturado procede-se à realização da consolidação, utilizando o módulo associado a esta fase.

O módulo Constant Stress utiliza-se na fase de consolidação para cada patamar de carregamento durante 24 horas, nesta fase através da interface do software define-se o incremento que se pretende realizar no provete, mantendo-se a contrapressão constante ao longo de todo o ensaio. Após a definição da tensão na câmara inicia-se então a aplicação do carregamento não drenado, iniciando-se a consolidação através da abertura de uma das válvulas da célula, após a qual o software continua com a monitorização da pressão intersticial.

Após o capítulo que agora termina realizou-se já uma ligação entre os conceitos gerais quer dos ensaios de consolidação quer da célula de consolidação com a célula de Rowe e o software de aquisição de dados existentes no DEC apresentados neste capítulo.

## **5. ESTUDO EXPERIMENTAL**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

No âmbito deste trabalho realizaram-se dois ensaios distintos: i) ensaio edométrico convencional e ii) ensaio de consolidação na célula de Rowe, ambos realizados no laboratório de mecânica dos solos do DEC.

Assim sendo, no trabalho experimental procurou-se determinar quando termina a fase de consolidação, ou seja conhecer o momento em que o excesso de pressão intersticial é nulo, dado que no ensaio edométrico convencional se admite que tal sucede após 24 horas, na célula de Rowe através da monitorização contínua do ensaio é possível saber quando tal sucede.

Neste capítulo realiza-se a comparação entre as normas utilizadas nos ensaios de consolidação, descreve-se o material ensaiado, realiza-se ainda uma apresentação da metodologia adoptada na montagem do provete e condições em que os ensaios são realizados.

Verifica-se a aplicabilidade da norma BS 1377: Part 6 – 1990 na célula de Rowe do laboratório, apresentando-se os resultados obtidos na implementação da mesma para as diferentes fases associadas ao ensaio. Apresenta-se também a forma como se procedeu quando não se seguiu a BS 1377 correctamente. Realiza-se ainda uma comparação e análise crítica dos resultados obtidos, para ambos os ensaios realizados.

Apresentam-se em seguida os traços gerais das normas utilizadas para cada ensaio bem como a comparação entre ambos, em termos de carga inicial, patamares de carga e descarga, realização de leituras a tempos e duração mínima do ensaio.

### **5.2 NORMAS UTILIZADAS**

No que ao ensaio edométrico convencional diz respeito realizou-se o ensaio com base na ASTM D 2435-04 “Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading”. Tomou-se esta opção após a consulta do Eurocódigo 7, norma de referência a nível europeu para mecânica dos solos, que remete para a norma indicada anteriormente.

Todavia devido às particularidades do ensaio de consolidação na célula de Rowe, a norma que aborda de forma mais abrangente o mesmo é a BS 1377: Part 6: 1990, “British Standard Methods of test for Soils for civil engineering purposes”, também esta citada pelo EC7, sendo a Parte 6, “Consolidation and permeability tests in hydraulic cells and with pore pressure measurement” a que define o ensaio que se pretende realizar no estudo experimental.

A norma ASTM D 2435-04 do ensaio edométrico, define um método para a determinação do grau de consolidação do solo quando este se encontra restringido lateralmente e sofre a aplicação de uma carga axial. No que concerne à BS 1377 para a célula de Rowe, o provete encontra-se confinado lateralmente sendo sujeito a uma carga axial aplicada hidraulicamente. A norma tem em conta a monitorização da pressão intersticial.

Apesar da tentativa de unificação das condições de ensaio para ambos os casos, constatou-se após o estudo das normas que existem algumas diferenças entre ambas. Nomeadamente no que diz respeito à carga inicial, aos patamares de carga e descarga, à duração mínima do ensaio e à realização das leituras a tempos. No quadro 5.1 apresenta-se um resumo das principais características do ensaio em cada uma das normas.

**Quadro 5.1 – Indicações da ASTM D 2435-04 e BS 1377 Parte 6 para o ensaio de consolidação**

	<b>Edométrico convencional</b>	<b>Célula de Rowe</b>
<b>Carga inicial</b>	5 kPa	0 kPa
<b>Patamares de carga</b>	12,25,50,100,200, etc. kPa	50,100, 200,300, etc. kPa
<b>Descargas do provete</b>	200 e 800 kPa	200 e 800 kPa
<b>Leituras a tempos</b>	Em todos os carregamentos	
<b>Duração mínima do ensaio</b>	Fim da consolidação primária	4 Patamares de carga

Apesar das diferenças apresentadas no Quadro 5.1, os ensaios são idênticos ao longo de uma série de patamares de carga e descarga, e apesar de elaboradas por entidades distintas e com propósitos também diferentes, é possível traçar-se um paralelo entre as mesmas, o que permite que os ensaios se realizem em condições semelhantes, podendo mesmo com uma ou outra alteração à norma, diferir apenas em questões relacionadas com o material utilizado para executar os diferentes ensaios, como são exemplos a célula de consolidação, a medição dos deslocamentos e a forma como se aplica o carregamento.

### 5.3 MATERIAL ENSAIADO

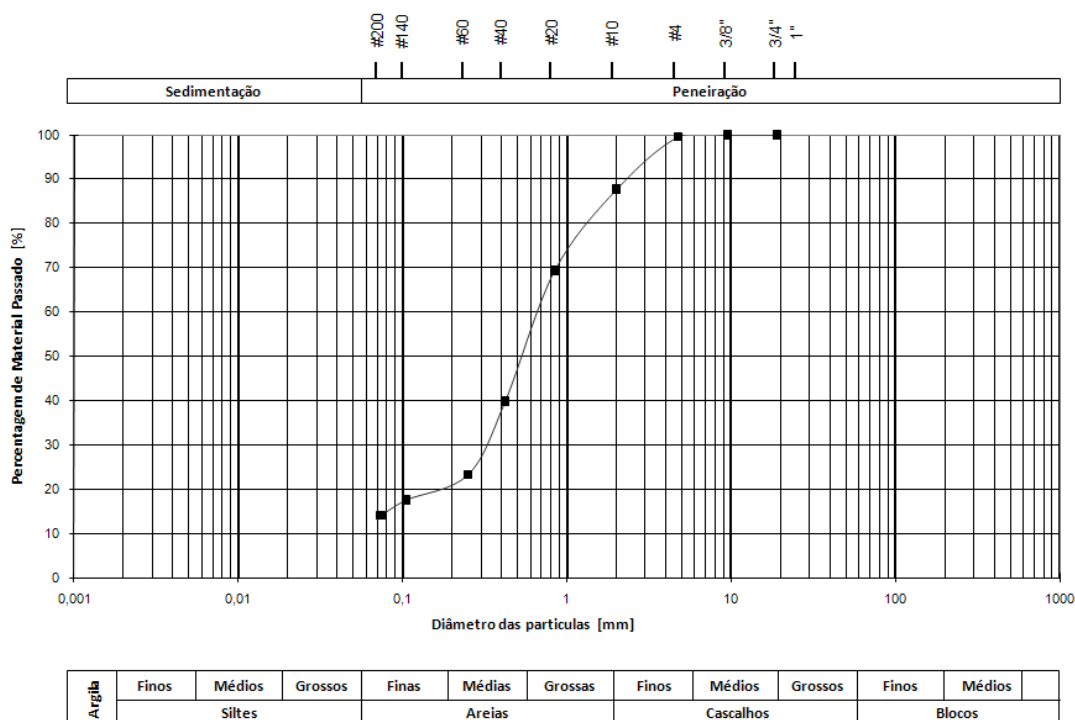
O material ensaiado é um solo existente no laboratório de mecânica dos solos do DEC, sobre a qual se realizaram ensaios de caracterização física. A análise granulométrica do material foi efectuada com base na especificação LNEC E 196-1966. Realizaram-se também ensaios de determinação de limites de consistência, com o objectivo de se determinar o limite de plasticidade, o limite de liquidez e ainda o índice de plasticidade, com base na NP 143-1969.

A densidade das partículas sólidas para a qual se obteve um valor de  $G=2,65$ , foi obtida em ensaios prévios realizados no âmbito das disciplinas de geotecnia leccionadas ao longo do curso de mestrado.

Os resultados obtidos estão apresentados nos Quadros 5.2 e 5.3 e na Figura 5.1:

**Quadro 5.2 – Material passado na peneiração fina**

Nº do peneiro	20	40	60	100	140	200
Malha ( mm )	0,84	0,42	0,25	0,15	0,11	0,07
Peso do material retido ( g )	4,80	7,70	4,30	0,00	1,50	0,90
% do material passado	69,28	39,78	23,30	23,30	17,56	14,11



**Figura 5.1 – Curva granulométrica do solo ensaiado**

**Quadro 5.3 – Propriedades físicas do solo ensaiado**

Propriedades físicas solo	Limite de Plasticidade	Limite de Liquidez	Índice Plasticidade
	21,02	32,92	11,90

Após as características descritas anteriormente apresentam-se no Quadro 5.4 a classificação do solo segundo a classificação unificada ASTM D-2487, a classificação para fins rodoviários AASHTO M 145-42 e a classificação SETRA/LCPC:

**Quadro 5.4 – Classificação do solo**

Classificação ASTM	Classificação AASHTO	Classificação SETRA/LCPC
SM	A-2-6 (0)	B6

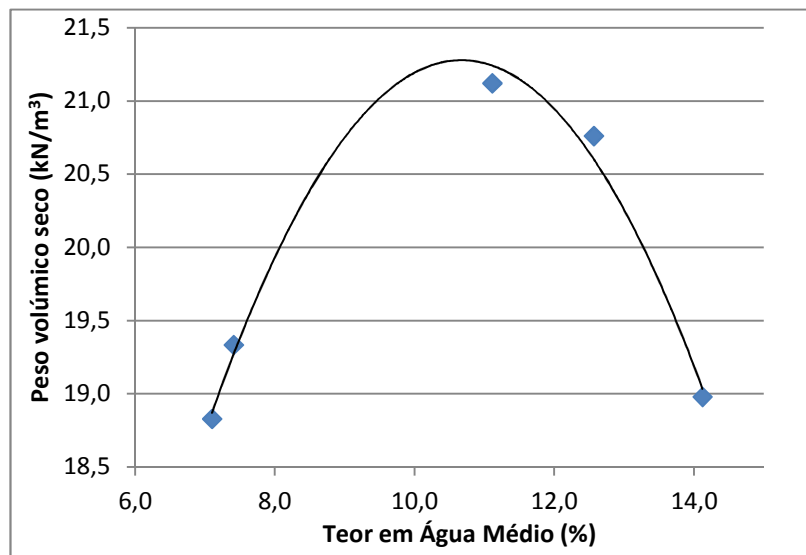
SM – Areia Siltosa

A-2-6 – Cascalho e areia siltosos ou argilosos

Uma vez que o solo possui um índice de plasticidade com uma percentagem de 11,9% e a percentagem de material passado no peneiro #200 é superior a 12 resulta pela classificação SETRA um solo com a classificação de B6.

Sobre uma amostra de areia siltosa com as características apresentadas anteriormente realizou-se, de acordo com a especificação LNEC E 197-1966, o ensaio tipo Proctor de compactação leve em molde pequeno o que corresponde a uma energia de compactação de 588060,1 J/m<sup>3</sup>.

Na Figura 5.2 apresenta-se a curva resultante do ensaio de compactação.



**Figura 5.2 – Curva de compactação do solo**

Da observação da curva de compactação têm-se um teor em água ótimo para o solo de 10,8 % e um peso volúmico seco de  $21,2 \text{ kN/m}^3$ .

## 5.4 ENSAIO EDMÉTRICO CONVENCIONAL

### 5.4.1 Montagem do provete

Apresentadas as características do material ensaiado, e antes de se proceder ao ensaio edométrico remoldou-se a amostra de areia-siltosa existente. Obteve-se o provete de areia-siltosa remoldada através da compactação leve do solo em molde pequeno com um teor em água de 13,7% e um peso volúmico de  $21,5 \text{ kN/m}^3$  tendo ainda uma energia de compactação de  $588060,1 \text{ J/m}^3$ .

O ensaio edométrico foi realizado de acordo a norma ASTM D 2435-04, encontrando-se na Figura 5.3 uma ilustração do equipamento utilizado. Para a realização do ensaio começa-se por colocar o provete num anel metálico que não permite movimento nem drenagem laterais. Nos topos do provete são colocadas placas porosas que permitem a drenagem livre em ambas as direcções. A área do provete no edométrico é de  $40,15 \text{ cm}^2$ .



**Figura 5.3 – Equipamento utilizado no edométrico convencional**



#### 5.4.2 Condições e tipo de ensaio

Deixa-se o provete submerso durante 24 horas antes de se iniciar a aplicação dos carregamentos que vão originar a consolidação do provete, de forma a aproximar o provete das piores condições de saturação existentes “*in situ*”. Entre cada incremento de carga ou descarga aguardaram-se 24 horas, para garantir que as pressões intersticiais se dissipam na totalidade. Estes carregamentos são aplicados paralelamente ao eixo vertical por meio de um sistema de alavanca.

No Quadro 5.5 apresenta-se o desenvolvimento dos patamares de carga ao longo do ensaio edométrico, os patamares de carga iniciam-se na carga inicial de 5 kPa sendo posteriormente realizados sucessivos incrementos de carga. Após uma série de incrementos de carga, procede-se a um conjunto de patamares de descarga, de acordo com a norma na descarga pode intercalar-se um em cada dois incrementos.

**Quadro 5.5 – Apresentação dos patamares de carregamento em kPa no ensaio edométrico**

5 → 12,5 → 24 → 49 → 98 → 196 → 49 → 12,5 → 196 → 391 → 782 → 196 → 49 → 12,5 → 782
--

De acordo com a norma ASTM D 2435-04 devem realizar-se leituras a tempos para todos os incrementos de carga. Ao longo do estudo realizaram-se as leituras a tempos em todos os patamares de carregamento a partir do incremento de tensão de 98 kPa para 196 kPa. No Quadro 5.6 apresentam-se os diferentes tempos em minutos, para os quais se procedeu a leituras. Podem encontrar-se dois tipos de leituras a tempos; estas escalas estão relacionadas com a escala em que se pretenda apresentar o tratamento de resultados.

**Quadro 5.6 – Apresentação da leitura a tempos utilizada no ensaio edométrico**

	Tempo em minutos
<b>Escala logarítmica</b>	0;0,1;0,25;0,5;1;2;4;8;15;30;60;120;240;480;1440
<b>Escala escalar</b>	0;0,1;0,25;0,5;1;2,25;4;9;16;25;36;49;64;90;120;240;480;1440

### 5.5 ENSAIO DE CONSOLIDAÇÃO NA CÉLULA DE ROWE

#### 5.5.1 Preparação e montagem do provete na célula de Rowe

Para a preparação do provete de areia-siltosa remoldada a utilizar na célula de Rowe, realizou-se uma compactação leve da areia-siltosa no proctor em molde pequeno, com uma energia de compactação de 588060,1 J/m<sup>3</sup>, foi realizada com um teor em água de 11,4% e um peso volúmico de 20,7 kN/m<sup>3</sup>, compactação após a qual se realizou o ajuste ao anel de ensaio. Após a apresentação das características do solo a ser ensaiado, no ensaio edométrico e na célula de Rowe, apresenta-se no Quadro 5.7 um resumo destas mesmas características no que diz respeito ao teor em água, ao peso volúmico seco e à energia de compactação.

**Quadro 5.7 – Resumo das características**

	Teor em água [%]	Peso volúmico seco [kN/m <sup>3</sup> ]	Energia de Compactação
Ótimo	<b>10,8</b>	<b>21,2</b>	<b>588060,1 [J/m<sup>3</sup>]</b>
Edométrico	<b>13,7</b>	<b>21,5</b>	
Célula de Rowe	<b>11,4</b>	<b>20,7</b>	

Na Figura 5.4 apresentam-se dois provetes, um por ajustar e o outro ajustado às dimensões pretendidas para o ensaio na célula de Rowe, apresentadas no Quadro 5.8.

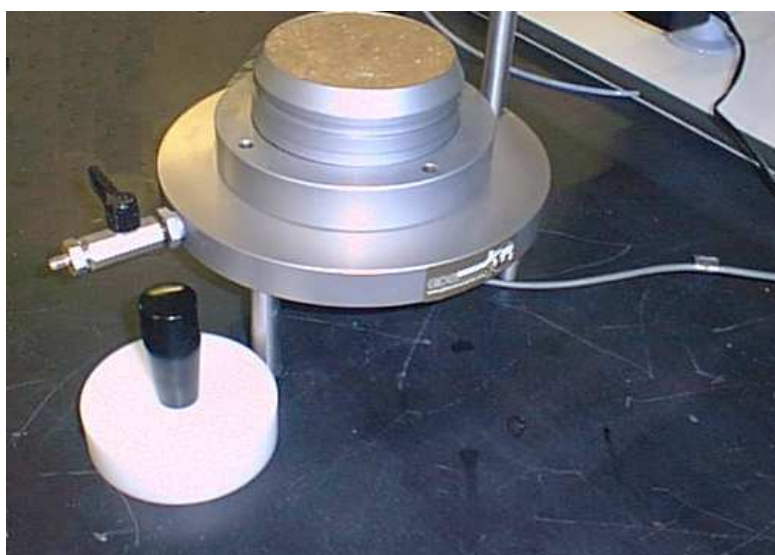


**Figura 5.4 – Ajuste do provete às dimensões pretendidas**

**Quadro 5.8 – Dimensões do provete a utilizar na célula de Rowe**

Diâmetro do provete [mm]	100
Área do provete [mm <sup>2</sup> ]	7853,98
Altura recomendada para o provete [mm]	16
Volume do provete (baseado na altura recomendada) [cm <sup>3</sup> ]	125,7

O conjunto anel mais provete é colocado nos dois anéis colocados previamente no interior da célula de Rowe com o auxílio de um pilão. Para a colocação do provete na célula de Rowe (Figura 5.5), coloca-se uma pedra porosa em contacto com a face superior do provete, após fechar a célula instala-se o deflectómetro de leitura de deslocamentos no suporte rígido ligado ao topo da célula.



**Figura 5.5 – Colocação do anel e do provete na base da célula de Rowe**

Informação mais pormenorizada relativa à preparação da amostra, e à montagem do provete na célula de Rowe encontra-se disponibilizada no Anexo A.

### 5.5.2 Condições e tipo de ensaio

Após a montagem do provete e de todo o sistema associado à célula de Rowe procedeu-se à execução do ensaio. A informação relativa à preparação da célula de Rowe para o ensaio de consolidação encontra-se descrita ao pormenor no Anexo B.

Para que o ensaio de consolidação segundo o estabelecido pela norma BS 1377 seja implementado na célula de Rowe de forma correcta, devem realizar-se uma série de etapas para cada patamar de carga que se aplique na célula: tais como a saturação do provete, a execução de um carregamento não drenado para que ocorra um “build-up” da pressão intersticial e, por fim a consolidação.

Para tal recorreu-se a duas modalidades de ensaio disponíveis no software: a Constant Stress e a CRLoad já apresentadas no Capítulo 4.3. No software GDSLab seleccionou-se o tipo de ensaio a executar, tendo o mesmo sido dividido em duas fases distintas uma de saturação do provete e outra de consolidação com a aplicação de um carregamento não drenado antes da drenagem, fases que se apresenta mais em pormenor no Anexo C.

Devem ainda realizar-se fases de descarga no provete. Definiu-se também a drenagem vertical no ensaio numa direcção com medição da pressão intersticial na base da célula. O carregamento aplicado na superfície de actuação de carga é flexível, permitindo que a deformação aconteça livremente.

Para garantir a saturação do provete foi necessário definir uma fase de saturação na célula de Rowe. A BS 1377 estabelece a colocação do provete sob acção de uma pressão intersticial suficientemente elevada para que o ar existente nos vazios seja absorvido pela água. O grau de saturação do provete determina-se através do coeficiente  $\delta u / \delta \sigma$ , onde  $\delta u$  representa a variação de pressão intersticial resultante de uma variação de tensão vertical  $\delta \sigma$ . A norma define que o provete se encontra saturado a partir de um  $\delta u / \delta \sigma$  igual a 0,95.

A saturação na célula de Rowe realizou-se com o auxílio da contrapressão, pois é através de incrementos alternados de tensão vertical e contrapressão onde não se permite a drenagem do provete que se consegue determinar o coeficiente de saturação  $\delta u / \delta \sigma$ .

Após a saturação do provete, a BS 1377 refere que antes da consolidação se deve realizar um carregamento não drenado em cada patamar de carga. Na célula de Rowe para o carregamento não drenado, o excesso de tensão aplicada ao provete é suportado pela pressão intersticial, mantendo-se a contrapressão constante. O facto de a pressão intersticial suportar a tensão aplicada ao provete faz com que durante o carregamento não drenado ocorra um crescimento da pressão intersticial, denominado de “buid-up” na norma utilizada. Este crescimento ocorre de forma mais rápida no início do carregamento não drenado, acabando por atingir um pico, decrescer um pouco e finalmente estabilizar.

Quando a pressão intersticial estabilizar, inicia-se a drenagem que vai permitir que ocorra a consolidação conforme estabelecido pela BS 1377. Ao permitir-se a drenagem no provete a pressão intersticial diminui, ou seja, dá-se a dissipação do excesso de pressão intersticial, resultante do carregamento não drenado. Nesta fase realizam-se as leituras a tempos da pressão intersticial na célula de Rowe, sendo a escala de leituras a utilizada no ensaio edométrico.

Utiliza-se a modalidade de software Constant Stress que já foi apresentada no capítulo 4.3, para a realização de toda a fase de consolidação, quer na aplicação do carregamento não drenado quer na fase em que se dá a drenagem do provete.

Assim que a consolidação para um patamar de carga terminar, isto é, dissipou-se no mínimo 95% do excesso de pressão intersticial, incrementa-se a pressão na câmara de acordo com o plano de carregamento estabelecido no Quadro 5.9.

Procedeu-se de igual forma para todos os patamares de carga e descarga até ao final da fase de consolidação, que por limitações do equipamento se atinge para tensões na ordem dos 1000 kPa. Como para o ensaio edométrico a consolidação para cada patamar de carga termina após 24 horas, cada patamar de carregamento na célula de Rowe teve a mesma duração, 1440 minutos.

A contrapressão na célula de Rowe influencia a tensão efectiva a que o provete se encontra sujeito, a apresentação da pressão na câmara e da contrapressão no Quadro 5.9 pretende que a tensão efectiva aplicada ao provete na célula de Rowe seja idêntica à aplicada no edométrico. Como referido no capítulo 4.3, quando se aplica a modalidade Constant Rate of Load a duração do estágio não é constante, pelo que não se apresenta o valor do mesmo.

No Quadro 5.9 apresenta-se o plano de carregamento em pormenor, as datas referentes a cada estágio do ensaio, a opção seleccionada no software para a aplicação do carregamento e a sua duração. Por fim as tensões aplicadas, e a fase do ensaio a que o provete se encontra sujeito são apresentadas.

**Quadro 5.9 – Plano do ensaio de consolidação na célula de Rowe**

Data	Estágio	Tipo	Tensões [kPa]		Duração [min.]	Observações
			Câmara	Contrapressão		
20-Dez-10	1	Constant Rate of Load	40	20	-	Saturação
20-Dez-10	2	Constant Stress	90	80	1440	Saturação
21-Dez-10	3	Constant Rate of Load	100	80	-	Saturação
21-Dez-10	4	Constant Stress	100	90	1440	Saturação
22-Dez-10	5	Constant Rate of Load	110	90	-	Saturação
22-Dez-10	6	Constant Stress	110	110	1440	Consolidação
04-Jan-11	7	Constant Stress	122	110	1440	Consolidação
05-Jan-11	8	Constant Stress	134	110	1440	Consolidação
06-Jan-11	9	Constant Stress	160	110	1440	Consolidação
07-Jan-11	10	Constant Stress	210	110	1440	Consolidação
10-Jan-11	11	Constant Stress	310	110	1440	Consolidação
11-Jan-11	12	Constant Stress	160	110	1440	Consolidação
12-Jan-11	13	Constant Stress	122	110	1440	Consolidação
13-Jan-11	14	Constant Stress	310	110	1440	Consolidação
14-Jan-11	15	Constant Stress	510	110	1440	Consolidação
17-Jan-11	16	Constant Stress	910	110	1440	Consolidação
18-Jan-11	17	Constant Stress	310	110	1440	Consolidação
19-Jan-11	18	Constant Stress	160	110	1440	Consolidação
20-Jan-11	19	Constant Stress	122	110	1440	Consolidação
21-Jan-11	20	Constant Stress	910	110	1440	Consolidação

## 5.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM A CÉLULA DE ROWE

### 5.6.1 Saturação

Ao longo deste subcapítulo apresentam-se os resultados obtidos para a saturação do provete, bem como o “build-up” da pressão intersticial e drenagem durante um patamar de carga e um de descarga na fase de consolidação, ao implementar-se a norma BS 1377 no ensaio de consolidação

na célula de Rowe apresentam-se ainda os resultados em termos de assentamentos. Como os procedimentos para cada patamar de carga ao longo do ensaio segundo a BS 1377 na célula de Rowe são idênticos, apesar de se apresentar todo o plano de ensaio, os resultados apresentados no Capítulo 5.6 referem-se apenas para o patamar de carga, o estágio nº 10, que corresponde a um incremento na tensão na câmara de 160 kPa para 210 kPa, e de descarga, o estágio nº 17, onde se altera a tensão na câmara de 910 kPa para 310 kPa.

Com a monitorização da pressão intersticial no primeiro estágio determina-se o grau de saturação inicial do provete. Este refere-se a um incremento de 10 kPa na tensão da câmara, para os 40 kPa pois, antes do início do ensaio o provete encontra-se sujeito a uma tensão de 30 kPa e uma contrapressão de 20. Estes 10 kPa de tensão efectiva inicial aplicada ao provete servem para evitar que exista uma dilatação do mesmo.

Pode referir-se que o grau de saturação inicial do provete é de aproximadamente 50 % pois para o incremento inicial de tensão no provete de 10 kPa, obteve-se um acréscimo de pressão intersticial  $\delta u$  de 5,3 kPa, pelo que se obtém um grau de saturação inicial  $\delta u / \delta \sigma$  de 53%.

Conforme estabelecido na BS 1377 para cada um dos incrementos de pressão na câmara fez-se o gráfico referente ao comportamento da pressão intersticial. Na Figura 5.6 apresenta-se a título exemplificativo o comportamento da pressão intersticial após o incremento de tensão no provete de 90 kPa para 100 kPa durante a fase de saturação. No gráfico, verifica-se que existe um acréscimo da pressão intersticial ao longo do tempo até que estabiliza. Após a pressão intersticial estabilizar, verificou-se que, para um acréscimo de tensão,  $\delta \sigma$ , de 10 kPa, o acréscimo de pressão intersticial,  $\delta u$ , apresentado foi de 9,3 kPa, obteve-se então um grau de saturação  $\delta u / \delta \sigma$  de 93,3%.

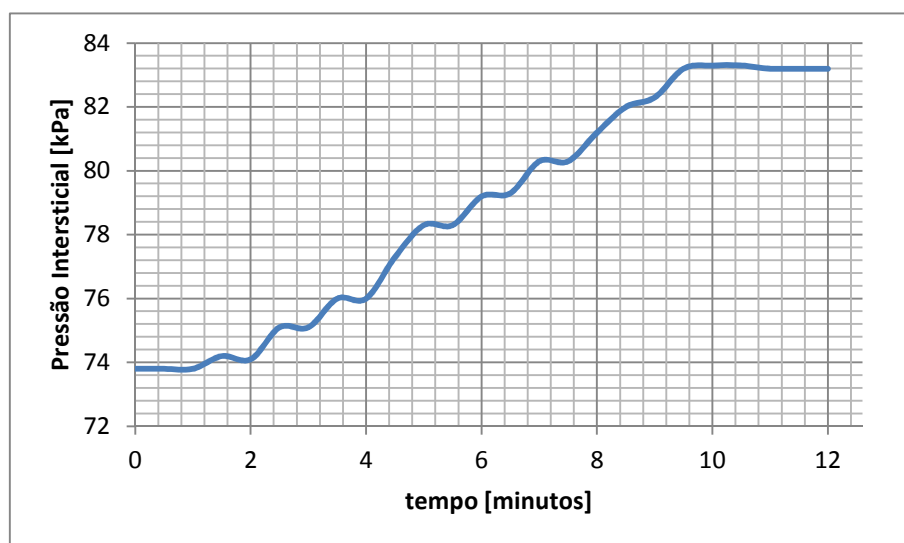


Figura 5.6 – Pressão intersticial ao longo de um estágio de saturação (Estágio 3)

No Quadro 5.10 apresenta-se o grau de saturação obtido para cada estágio realizado na saturação. Após o segundo incremento de carga de 50 kPa, como definido na norma, o grau de saturação estava próximo dos 95%, pelo que o terceiro incremento serviu para verificar que efectivamente o provete já se encontrava saturado.

Quadro 5.10 – Grau de saturação em função da tensão aplicada ao provete

Tensão na câmara [kPa]		Grau de Saturação [%]
Inicial	Final	
30	40	53,0
90	100	93,3
100	110	96,0

### 5.6.2 Carregamento não drenado e consolidação

Na Figura 5.7 é possível ver um exemplo do "build-up" da pressão intersticial, resultante do crescimento da pressão intersticial durante o carregamento não drenado, para o ensaio de consolidação na célula de Rowe relativo ao patamar de carga em que se incrementou a tensão na câmara de 160 kPa para 210 kPa.

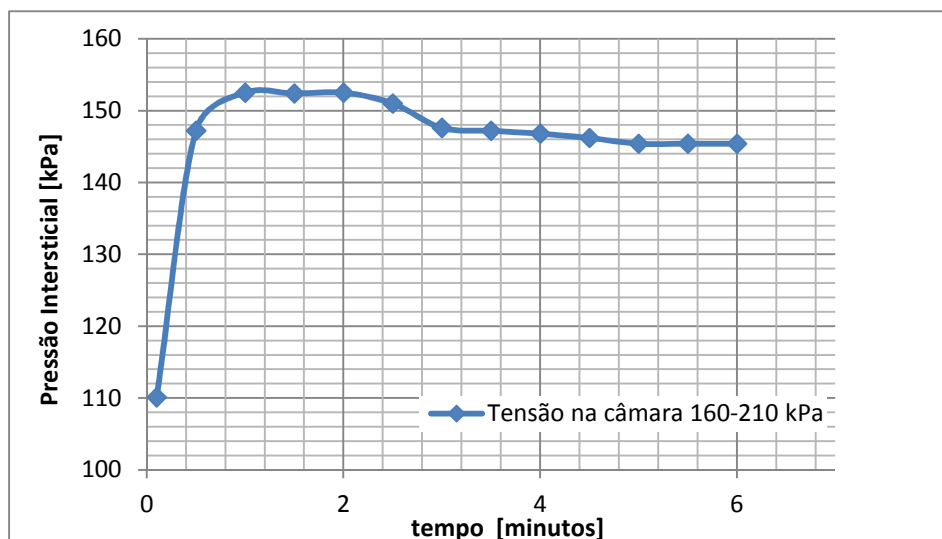


Figura 5.7 – Pressão intersticial ao longo do tempo na fase de build up

Utilizando os valores das leituras a tempos da pressão intersticial apresenta-se na Figura 5.8 como exemplo a curva da pressão intersticial em função do tempo para o incremento de tensão na câmara de 160 kPa para 210 kPa. A pressão intersticial ao longo da fase de consolidação acabou por estabilizar por volta dos 3 minutos para o "build-up" da pressão intersticial, na fase em que se permite a drenagem estabilizou aos 100 minutos.

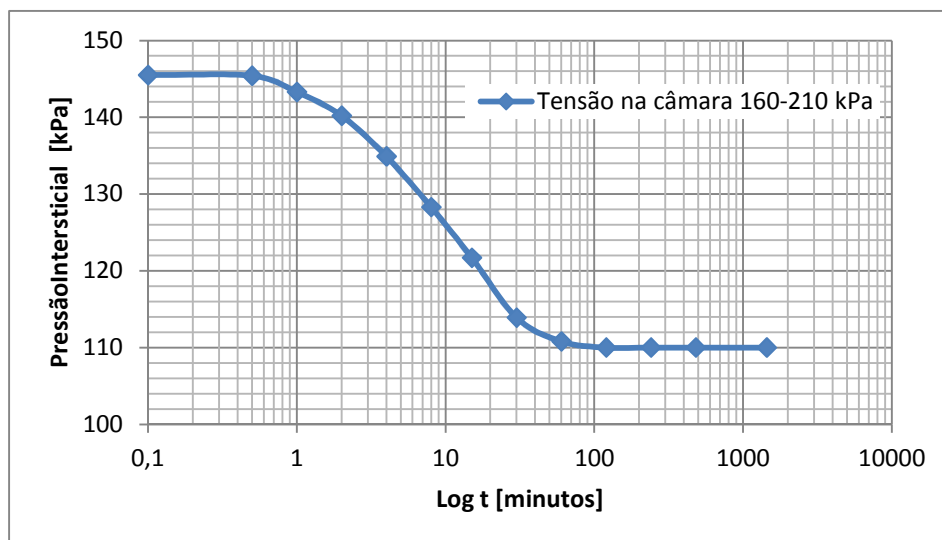


Figura 5.8 – Pressão intersticial em função do logaritmo do tempo para a fase de consolidação

Na Figura 5.9 apresenta-se a sobreposição do carregamento não drenado com o gráfico da consolidação, para o patamar de carga de 160 kPa para 210 kPa. Pretende-se assim, dar a conhecer a evolução da pressão intersticial desde o início até ao final da fase de consolidação para o patamar utilizado com exemplo. Pode observar-se na Figura 5.9 que quando se aplica o carregamento não drenado dá-se o incremento da pressão intersticial, quando esta estabiliza como se permite a

drenagem, a pressão intersticial começa a diminuir até atingir o valor anterior à aplicação do carregamento não drenado.

Ao analisar o comportamento da pressão intersticial na Figura 5.9 tem-se a noção da fase em que se encontra o ensaio, pois nos primeiros 10 minutos verifica-se que a pressão intersticial sofre um “build-up”, estamos portanto na aplicação de um carregamento não drenado, assim que se permite a drenagem a pressão intersticial diminui, situação característica da fase de consolidação. Da observação da Figura 5.9 conclui-se que a consolidação termina após 100 minutos, pois a pressão intersticial estabiliza.

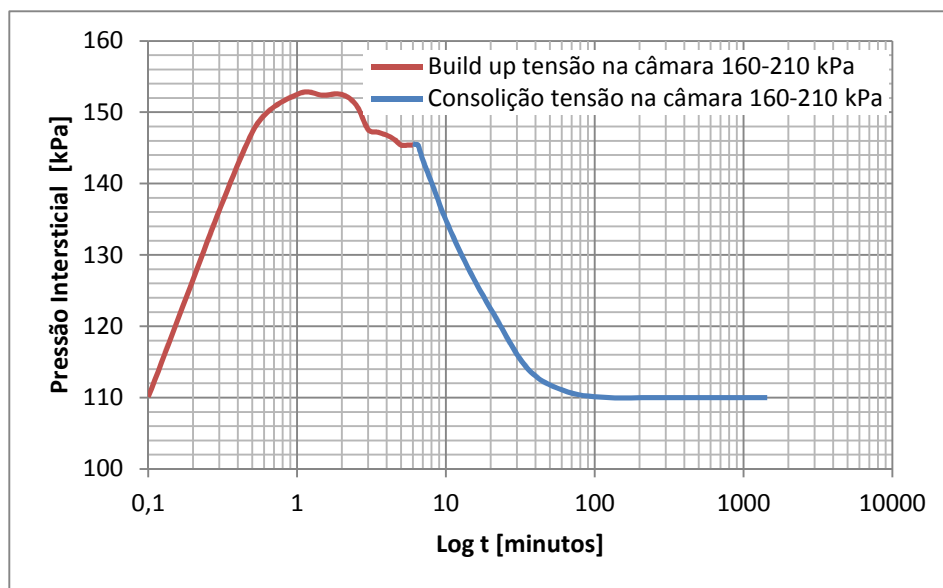


Figura 5.9 – Sobreposição do build-up com a fase de consolidação

Na Figura 5.10 apresenta-se a dissipação da pressão intersticial ao longo do tempo para o incremento de tensão na câmara de 160 para 210 kPa, após terminar o “*buil-up*”. A dissipação da pressão intersticial pode relacionar-se com a pressão intersticial na medida em que, por se tratar do mesmo patamar de carga enquanto a dissipação da pressão intersticial aumenta, os valores da pressão intersticial diminuem, acabando por estabilizar ambos ao mesmo tempo como seria de esperar.

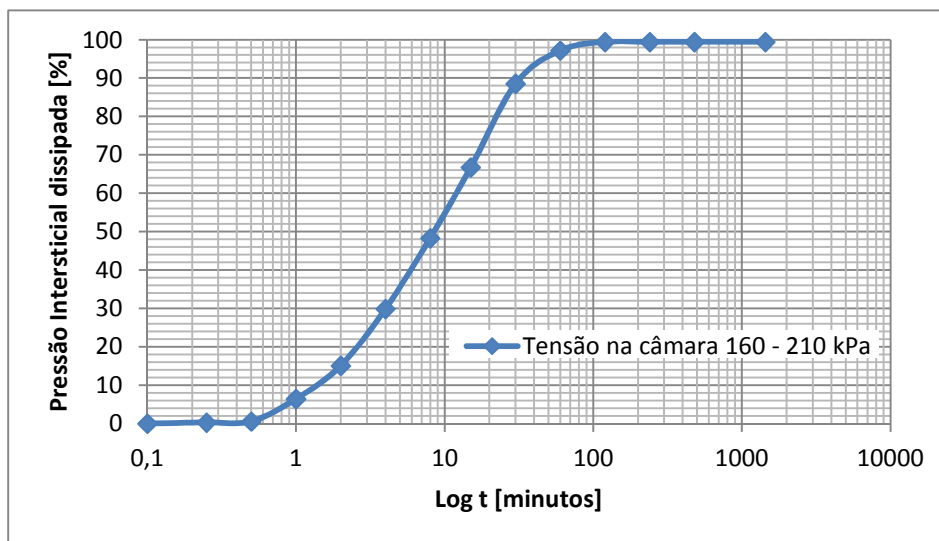
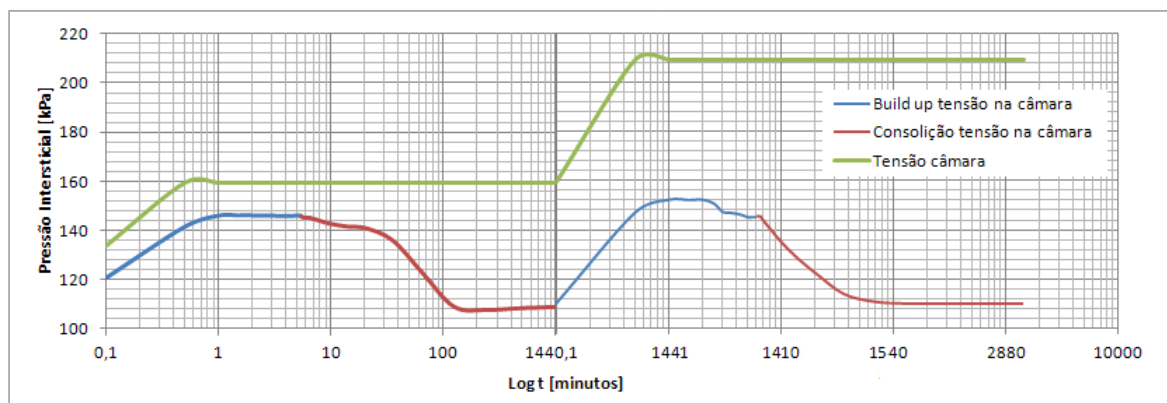


Figura 5.10 – Percentagem de pressão intersticial dissipada

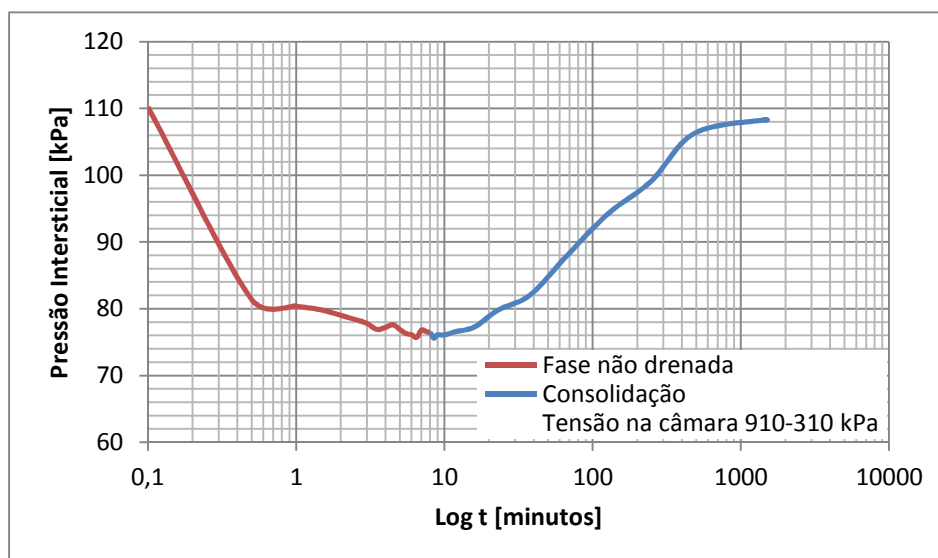
Na Figura 5.11 apresenta-se o gráfico obtido através da sobreposição de dois patamares de carregamento consecutivos no ensaio de consolidação na célula de Rowe. O gráfico apresenta a pressão intersticial em função do tempo, para um incremento de tensão na câmara de 134 kPa para 160 kPa e para o incremento seguinte de 160 kPa para 310 kPa. Na figura 5.11 apresenta-se ainda o andamento da tensão na câmara ao longo de ambos os estágios de ensaio.



**Figura 5.11 – Sobreposição de dois estágios de carregamento no ensaio na célula de Rowe**

Da análise da sobreposição dos dois estágios resulta que ao invés de 48 horas, se poderia proceder à realização dos dois patamares do ensaio em 3 horas, caso se estabeleça o incremento de patamar de carga após o fim da consolidação, o que não sucedeu no nosso caso pois pretendia-se executar o ensaio em condições de execução idênticas às do ensaio edométrico.

Para os patamares de descarga procedeu-se igualmente de acordo com o estabelecido na BS 1377. Apresenta-se na Figura 5.12 como exemplo, o gráfico da pressão intersticial ao longo do patamar de descarga de 910 kPa para 310 kPa. Como esperado a pressão intersticial apresenta um comportamento inverso ao da aplicação de um carregamento, pois a pressão intersticial desce durante a fase não drenada, e cresce quando se permite a drenagem.



**Figura 5.12 – Evolução da pressão intersticial ao longo do patamar de descarga**



Apresenta-se na Figura 5.13, o gráfico exemplificativo da percentagem de pressão intersticial absorvida pelo provete correspondente ao patamar de descarga de 910 kPa para 310 kPa. Observa-se que após 1440 minutos a totalidade da pressão intersticial foi absorvida.

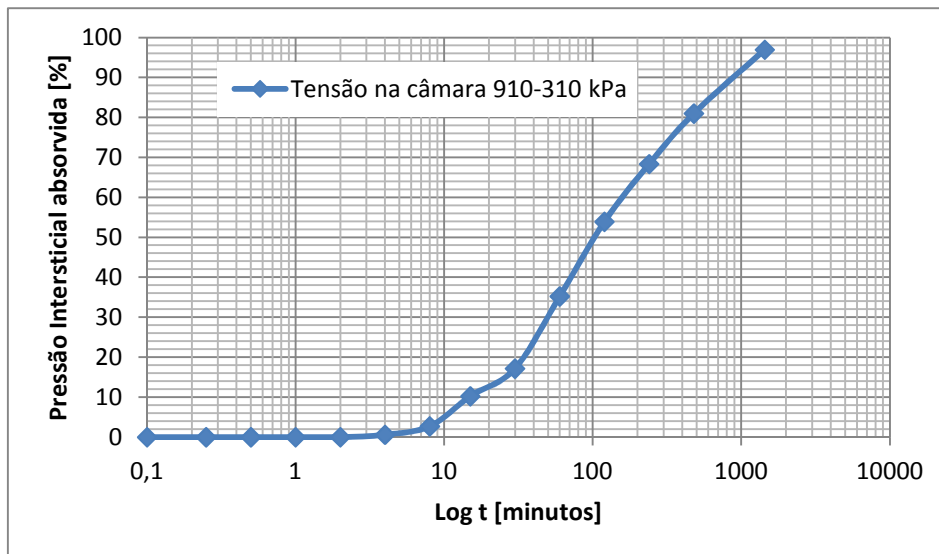


Figura 5.13 – Percentagem de pressão intersticial absorvida na descarga

### 5.6.3 Assentamentos segundo a BS 1377

A norma estabelece a apresentação do gráfico dos deslocamentos em função do tempo para cada patamar, como se pretende verificar a aplicabilidade da BS 1377 na célula de Rowe apesar de se terem realizado os gráficos para todos os patamares, apresentam-se apenas a título exemplificativo os gráficos para um patamar de carga e de descarga.

Na Figura 5.14 apresenta-se um exemplo da evolução do deslocamento axial na célula de Rowe durante o incremento de tensão na câmara de 160 para 210 kPa. Da análise da Figura 5.14 observa-se que o deslocamento axial apresenta um crescimento contínuo até estabilizar por volta dos 500 minutos.

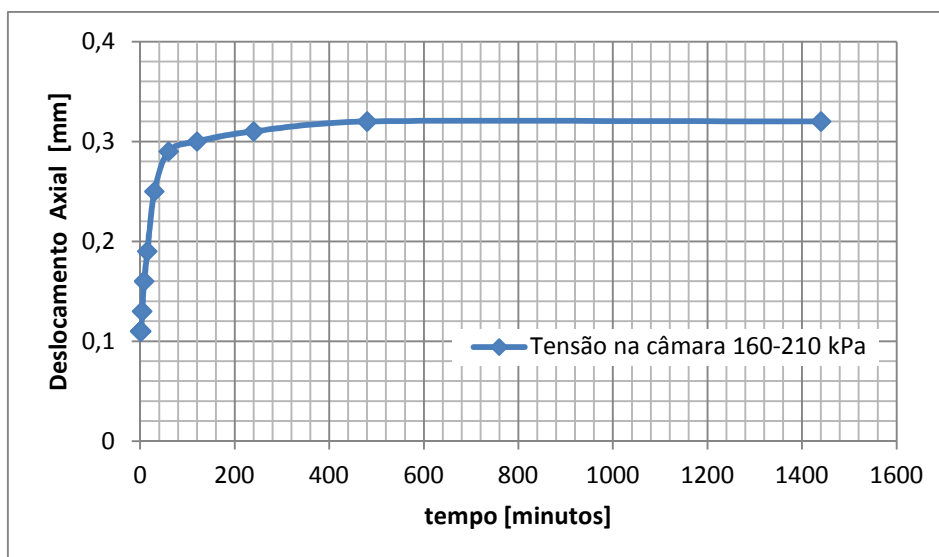
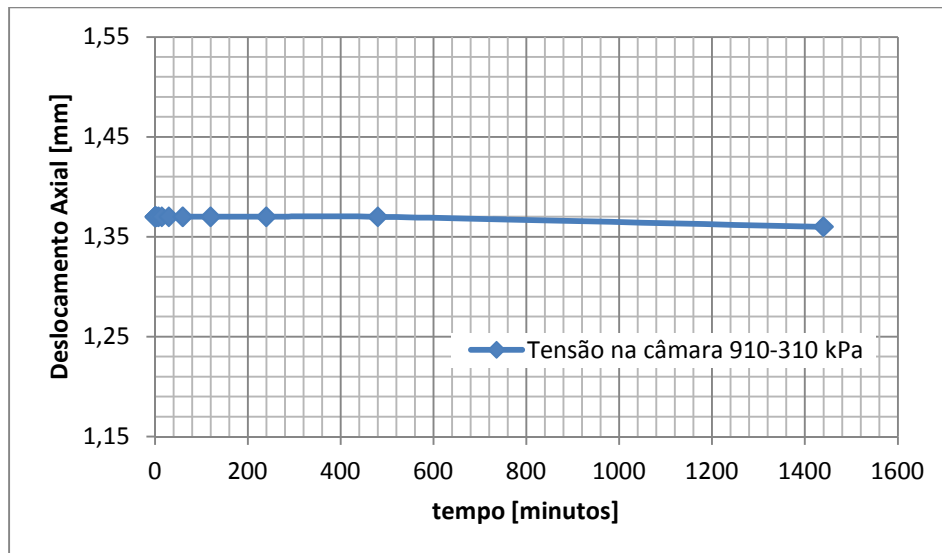


Figura 5.14 – Deslocamento axial do provete para o carregamento

Apesar de a consolidação terminar aos 100 minutos, quando se analisa o ensaio em função dos deslocamentos verifica-se que a estabilização ocorre mais tarde, tal situação encontra-se relacionada com a fluência tem no solo.

Na Figura 5.15 apresenta-se o deslocamento axial ao longo da descarga na tensão da câmara de 910 kPa para 310 kPa. Verifica-se após os 500 minutos que se dá um pequeno empolamento.



**Figura 5.15 – Deslocamento axial no provete para a descarga**

No Anexo D encontram-se preenchidos os boletins de ensaio segundo a BS 1377 para a implementação do ensaio de consolidação na célula de Rowe, para um patamar exemplificativo.

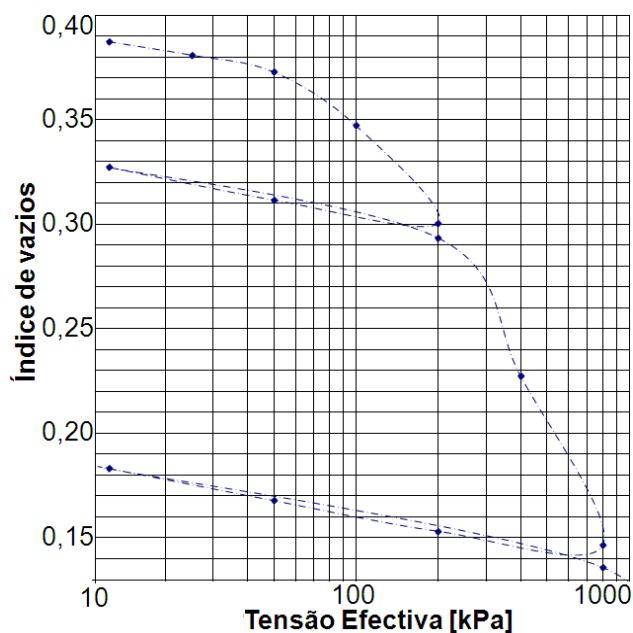
## 5.7 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

### 5.7.1 Ensaio edométrico vs célula de Rowe

Nesta secção apresentam-se os gráficos resultantes do ensaio edométrico e da implementação da BS 1377 na célula de Rowe. Apresentam-se os valores obtidos para a tensão de pré-consolidação, e grau de sobreconsolidação. Por fim apresentam-se os gráficos resultantes da determinação do coeficiente de consolidação pelos diferentes métodos apresentados no Capítulo 2.

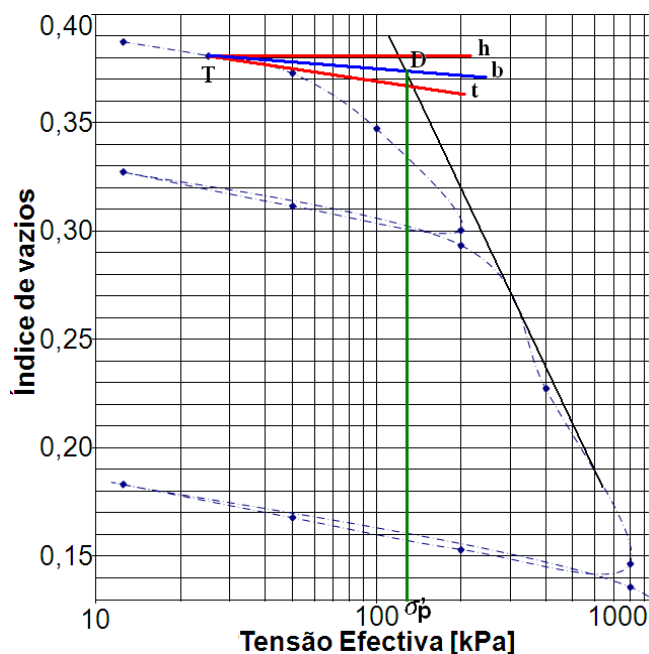
Na Figura 5.16, apresenta-se o gráfico do índice de vazios vs tensão efectiva, resultante do ensaio edométrico. Da análise do gráfico constata-se que, se encontram bem definidos os dois ramos correspondentes aos sucessivos patamares de carga, os dois trechos de recompressão e as duas sequências de descarga realizadas com base no plano de carregamento apresentado anteriormente no capítulo 5.4.2 também se encontram bem definidos.

Verifica-se ainda que o índice de vazios para cada trecho se comporta de acordo com a condição que se está a impor no solo. Da análise do gráfico índice de vazios em função da tensão efectiva aplicada ao solo, consegue ter-se uma noção do plano de carregamento aplicado no ensaio edométrico.



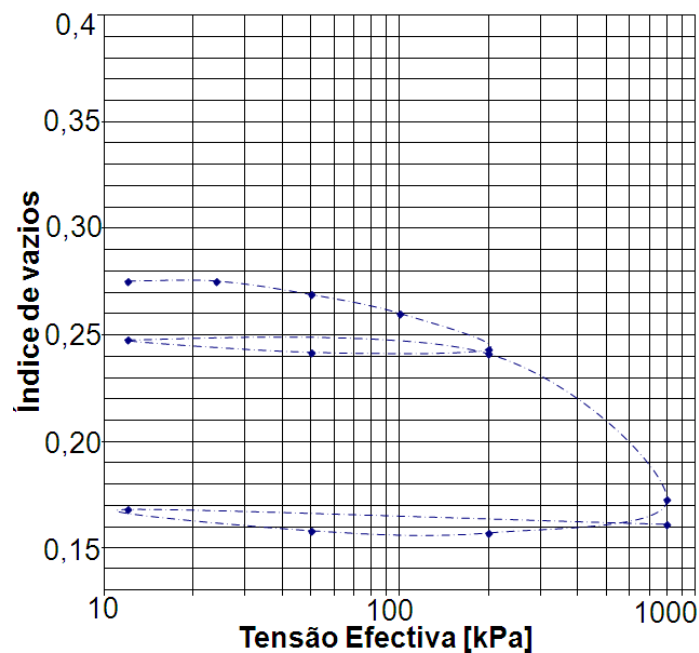
**Figura 5.16 – Índice de vazios em função da tensão efectiva para o ensaio edométrico**

Na Figura 5.17 apresenta-se a construção de Casagrande definida no Capítulo 2, aplicada no gráfico índice de vazios em função da tensão efectiva resultante do ensaio edométrico. Da construção apresentada na Figura 5.17 resulta um valor para a tensão de pré-consolidação  $\sigma'_p$  de 130 kPa, a ser utilizado posteriormente na determinação do OCR referente ao ensaio edométrico.



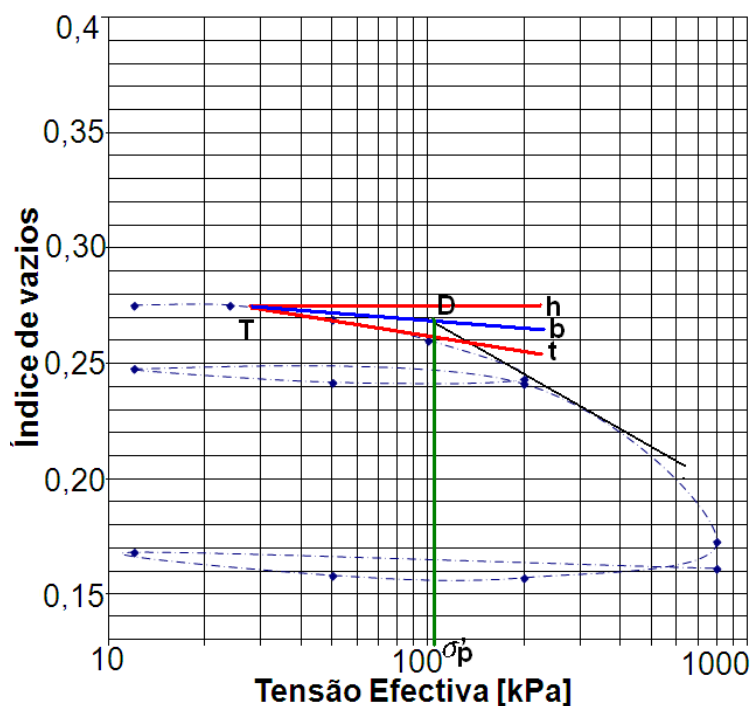
**Figura 5.17 – Construção de Casagrande para o ensaio edométrico**

Na figura 5.18 encontra-se o gráfico do índice de vazios vs tensão efectiva resultante da implementação da BS 1377 na célula de Rowe. Constata-se da análise do gráfico o plano de carregamento a que o solo foi sujeito, no entanto como o índice de vazios inicial difere do apresentado no ensaio edométrico, não se compara a evolução do índice de vazios entre ambos os ensaios.



**Figura 5.18 – Índice de vazios em função da tensão efectiva para o ensaio na célula de Rowe**

Na Figura 5.19 apresenta-se construção de Casagrande aplicada ao gráfico do índice de vazios em função da tensão efectiva resultante do ensaio de consolidação na célula de Rowe. Da construção apresentada na Figura 5.19 resulta um valor da tensão de pré-consolidação  $\sigma'_p$ , de 110 kPa. A ser utilizado na determinação do OCR para o ensaio na célula de Rowe.



**Figura 5.19 – Construção de Casagrande para o ensaio na célula de Rowe**

Apesar do diferente índice de vazios inicial tanto o ensaio edométrico como o ensaio de consolidação na célula de Rowe apresentam um andamento semelhante.

## 5.7.2 Coeficientes de consolidação

Tendo em conta a importância do coeficiente de consolidação ( $c_v$ ) nos problemas de mecânica dos solos e a teoria apresentada anteriormente no Capítulo 2.4, foram determinados os valores de  $c_v$  para vários patamares de carga.

Com base na tensão de pré-consolidação e nos resultados do ensaio edométrico, apresenta-se no Quadro 5.11 os valores do grau de sobreconsolidação, OCR, e do coeficiente de consolidação obtidos pelo método de Taylor e Casagrande para todos os patamares de carga em que se realizaram leituras a tempos.

Os elevados valores de OCR para o ensaio de consolidação no edométrico correspondem a tensões baixas após as fases de descarga, o que faz com que a tensão a que solo já esteve sujeito incrementalmente para tais valores o OCR.

**Quadro 5.11 –  $C_v$ 's pelo método de Taylor e Casagrande no ensaio edométrico**

Ramo	Patamar de carregamento [kPa]	OCR	$c_v$ [cm <sup>2</sup> /min.]	$m_v$ [kPa <sup>-1</sup> ]	$k$ [m <sup>2</sup> /s]	Método
virgem	98-196	NC	0,0197	$3,49 \times 10^{-4}$	$6,88 \times 10^{-9}$	Taylor
			0,0205		$7,16 \times 10^{-9}$	Casagrande
recarga	12,5-196	15,7	0,0366	$1,36 \times 10^{-4}$	$4,97 \times 10^{-9}$	Taylor
			0,0364		$4,94 \times 10^{-9}$	Casagrande
virgem	196-391	NC	0,0303	$2,56 \times 10^{-4}$	$7,74 \times 10^{-9}$	Taylor
			0,0322		$8,23 \times 10^{-9}$	Casagrande
virgem	391-782	NC	0,0245	$1,66 \times 10^{-4}$	$4,07 \times 10^{-9}$	Taylor
			0,0256		$4,25 \times 10^{-9}$	Casagrande
recarga	12,5-782	62,6	0,0634	$5,08 \times 10^{-5}$	$3,22 \times 10^{-9}$	Taylor
			0,0671		$3,41 \times 10^{-9}$	Casagrande

Verifica-se através da observação do quadro que o coeficiente de consolidação apresenta resultados bastante semelhantes para ambos os métodos. Por outro lado, verificou-se que o valor de  $c_v$  não varia significativamente com o estado de tensão, ou seja com a profundidade, no entanto quando se comparam os valores do ramo virgem com o ramo de recarga nota-se um incremento nos valores do coeficiente de consolidação para a situação de recarga.

Observa-se ainda que existe uma discrepância entre os valores do coeficiente de consolidação quando o solo se encontra sobreconsolidado ou quando está normalmente consolidado, sendo os valores do  $c_v$  superiores quando o solo se encontra sobreconsolidado, aumentando quando o grau de sobreconsolidação é superior.

As tensões para as quais se executaram leituras a tempos na determinação do coeficiente de consolidação no ensaio edométrico e na implementação da BS 1377 na célula de Rowe apresentam algumas diferenças. Esta discrepância está relacionada com o facto de para tensões pequenas no ensaio edométrico não se realizarem leituras a tempos. Na célula de Rowe como as leituras são realizadas de forma automática constam desde o primeiro incremento.

Com os resultados obtidos na implementação do ensaio de consolidação segundo a BS 1377 na célula de Rowe, apresenta-se no Quadro 5.12 um resumo dos valores do coeficiente de consolidação obtidos pelo método da dissipação de pressão intersticial para uma série de patamares de carregamento a título exemplificativo.

**Quadro 5.12 –  $C_v$ 's pelo método da dissipação da pressão intersticial na célula de Rowe**

Tensão na câmara [kPa]	Tensão efectiva [kPa]	OCR	$c_v$ [cm <sup>2</sup> /min.]	$m_v$ [kPa <sup>-1</sup> ]	$k$ [m <sup>2</sup> /s]	Método
160-210	50-100	1,25	0,105	$3,02 \times 10^{-4}$	$3,17 \times 10^{-8}$	Dissipação da pressão intersticial
310-510	200-400	NC	0,025	$1,69 \times 10^{-5}$	$4,22 \times 10^{-10}$	
510-910	400-800	NC	0,205	$5,03 \times 10^{-5}$	$1,03 \times 10^{-8}$	

Para tensões efectivas inferiores a 50 kPa, não se encontraram resultados em concordância, pelo que se confirma o que a norma define como aconselhável, ou seja a tensão efectiva deve partir de um valor inicial de 50 kPa. Daí que para tensões inferiores não se tenham apresentado os respectivos coeficientes de consolidação.

No entanto, os valores dos coeficientes de consolidação obtidos pelo método da dissipação da pressão intersticial parecem indicar um aumento do  $c_v$  com o aumento do carregamento. No entanto seria necessário obter mais valores de  $c_v$  para escalões de carga intermédios, de modo a verificar esta ideia, algo que poderá ser desenvolvido em estudos futuros, pois pretendeu-se com esta dissertação demonstrar pela primeira vez a possibilidade de execução do ensaio na célula de Rowe existente no DEC, bem como a sua funcionalidade.

Como o índice de vazios inicial para o ensaio de consolidação no ensaio edométrico era diferente do ensaio de consolidação na célula de Rowe, daí não se poderem comparar os valores de  $c_v$ 's entre si.

Pretendeu-se assim ao longo do Capítulo 5 que agora termina dar a conhecer em pormenor os elementos associados ao estudo experimental em ambos os ensaios, desde a montagem do provete passando pelas condições de ensaio e apresentando-se os resultados obtidos através do mesmo, sem esquecer a implementação da BS 1377 no ensaio de consolidação na célula de Rowe. No capítulo seguinte apresentam-se as conclusões resultantes do capítulo que agora termina, bem como se dá a conhecer ainda uma série de desenvolvimentos futuros que podem vir a ser estudados, por aqueles a quem esta dissertação possa eventualmente suscitar interesse.

## 6. CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES

O presente capítulo resume as principais conclusões resultantes dos ensaios experimentais realizados neste trabalho.

Nomeadamente, a comparação das normas utilizadas, a implementação da BS 1377 na célula de Rowe, e a comparação do ensaio na célula de Rowe com os ensaios edométricos convencionais.

Foi implementada a BS 1377: 1990, “British Standard Methods of test for Soils for civil engineering purposes”, Parte 6, “Consolidation and permeability tests in hydraulic cells and with pore pressure measurement” na célula de Rowe existente no laboratório de mecânica dos solos do DEC da FCT-UNL, tendo-se obtido um conjunto de resultados que permitem estudar a consolidação de forma adequada.

A utilização da célula de Rowe, permitiu concluir que o excesso de pressão intersticial gerado se dissipa muito rapidamente.

Da comparação do ensaio edométrico com a célula de Rowe, resulta que comparativamente ao tempo que habitualmente se espera para que se garanta o fim da consolidação no ensaio edométrico convencional, que é de 1440 minutos, quando se analisam os valores monitorizados na célula de Rowe, constata-se que após 100 minutos, o excesso de pressão intersticial se dissipa completamente, ou seja, a consolidação termina ao fim desse tempo. Após este tempo pode passar-se para o patamar de carregamento seguinte, quando se pretende estudar a consolidação.

Tendo em consideração que a drenagem se realiza em apenas uma direcção na célula de Rowe (ao passo que no ensaio edométrico esta drenagem se realiza em ambas as direcções) o ganho de tempo conseguido adquire ainda maior importância, pois por norma os ensaios com drenagem em duas direcções dissipam a pressão intersticial a uma velocidade 4 vezes superior.

O estudo experimental permitiu comprovar ainda que os valores do coeficiente de consolidação apresentados pelo método de Casagrande e pelo método de Taylor são idênticos. Nos resultados obtidos na célula de Rowe e no ensaio edométrico, para o coeficiente de consolidação é possível verificar o comportamento similar dos valores quando o solo se encontra normalmente consolidado e sobreconsolidado.

Esta conjuntura de situações permite-nos concluir que a realização do ensaio de consolidação na célula de Rowe permite-nos ganhar bastante tempo. Todavia deve ter-se em consideração que quando se analisam os gráficos dos deslocamentos em função do tempo, já não se verifica um ganho de tempo tão grande. Este facto não vem colocar em causa as conclusões anteriores, mas permite concluir que, mesmo após a consolidação terminar o solo continua a sofrer assentamentos. A razão destes assentamentos prende-se com o facto de também o solo se encontrar sujeito ao fenómeno de fluência, o que leva a que os deslocamentos se prolonguem no tempo.

Comprova-se ainda a eficácia da célula de Rowe, no que à monitorização das pressões intersticiais e comparação com ensaios edométricos tradicionais diz respeito, que foi o principal objectivo desta dissertação, permitindo ainda obter de forma mais rápida as grandezas que associadas à determinação do coeficiente de consolidação. Podemos então afirmar que a utilização do ensaio de consolidação na célula de Rowe vai permitir uma diminuição do tempo de espera na obtenção dos resultados experimentais, quando comparado com os ensaios edométricos tradicionais.

## 6.2 ESTUDOS FUTUROS

Com este trabalho, tentou-se contribuir para o desenvolvimento do estudo da consolidação na célula de Rowe, que apesar das potencialidades que possui não é ainda amplamente divulgada. No entanto, existem ainda algumas características que podem ser estudadas para maximizar as suas potencialidades. Por fim, são sugeridas algumas propostas para trabalhos futuros, que permitam esclarecer e aprofundar alguns dos aspectos relacionados com este tema, que ainda não foram investigados:

- a utilização de outras modalidades de ensaio do software da célula de Rowe para o estudo da consolidação, permitindo a realização de ensaios de consolidação especiais, como por exemplo o ensaio CRS;

- realização de ensaios com diferentes condições de carregamento e drenagem previstas na BS 1377;

- seria interessante implementar-se uma forma de alteração de estágio automática, para com isso não ser necessária a interacção *operador – ensaio* diariamente, aumentando ainda mais as vantagens da célula de Rowe;

- implementação em modelos computacionais do ensaio de consolidação na célula de Rowe, como complemento futuro interessante, tirando proveito dos desenvolvimentos tecnológicos dos dias que correm;

- aumento da capacidade de carregamento para permitir o estudo da consolidação para tensões maiores;

- o estudo do coeficiente de consolidação em função da profundidade, determinando o  $c_v$  para todos os patamares de carga;

- realização de patamares de carregamento idênticos no estado normalmente consolidado e no estado sobreconsolidado de modo a poder concluir-se sobre a variação de  $c_v$  com o grau de sobreconsolidação;

- estudo da consolidação secundário, utilizando os resultados provenientes da célula de Rowe e do ensaio edométrico convencional.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2004). AASHTO M 145–91 *Classification of Soil and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1-8.
- Aboshi, H., Yoshikumi, H., Murayama, S. (1970). *Constant Loading Rate Consolidation Test*. Soils and Foundation Vol.10, pp. 159-174.
- Almeida, M.S.S. (1988). *Ensaioes especiais de adensamento*. Simpósio sobre novos conceitos em ensaios de campo e de laboratório em Geotecnia, Rio de Janeiro. Vol.1, pp. 1-28.
- Antão, A. (2008). *Mecânica dos Solos C*. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.
- ASTM. (2004). ASTM D 2435–04 *Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading*. American Society for Testing and Materials, 1-10.
- ASTM. (2004). ASTM D 2487–06 *Standard practice for classification of soil for engineering purposes*. American Society for Testing and Materials, 1-12.
- Bishop, A.W., Henkel, D.J. (1957 & 1962). *The measurement of soil properties in the triaxial test*. Edward Arnold, Londres.
- Blewett, J., McCarter, W.J., Chrisp, T.M., Starrs, G. (2002). *An automated and improved laboratory consolidation system*. Canadian Geotechnical Journal, Vol.39, pp. 738-743.
- Bowles, J.E. (1996). *Foundation Analysis and Design*. Mc Graw-Hill, 5ª Edição, pp. 56-90.
- BSI (1990). *BS1377:1990 Methods of Tests for Soils for Civil Engineering Purposes Part 6. Consolidation and Permeability Tests in Hydraulic Cells and with Pore Pressure Measurement*. British Standards Institution, London.
- Budhu, M. (2007). *Soil Mechanics & Foundations*. J.Wiley & Sons, 2ª Edição, pp. 141-182.
- Burghignoli, A. (1979). *An Experimental Study of the Structural Viscosity of Clays by Means of Continuous Consolidation Tests*. VII European Conference of Soils Mechanics and Foundation, Brighton, Vol.2, pp. 23-28.
- Caputo, H.P. (1996). *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*. Livros Técnicos e Científicos, 6ª Edição, Vol.1 e Vol.2.
- Carvalho, S.R.L. (1989). *Ensaioes de adensamento edométrico com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo na argila do Sarapuí*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, COOPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Craig, R.F. (2004). *Craig's Soil Mechanics*. Spoon Press, 7ª Edição, pp. 227-260.
- Crawford, C.B. (1964). *Interpretation of the Consolidation Test*. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASGE, Vol.90, pp. 93-108.
- EC7. (2004). *EN 1997-2-Eurocode 7, Geotechnical design, Part 2: Ground investigation and testing*. CEN, European Committee for Standardization.

- Escario, V., Uriel, S. (1961). *Determining the Coefficient of Consolidation and Horizontal Permeability by Radial Drainage*. V ICSMFE, Vol.1, pp. 83-87.
- Fernandes, M.M. (1994). *Mecânica dos Solos*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Vol.1.
- GDS (2000). *The GDS Consolidation Testing System Hardware Handbook, GDSCTS*. Global Digital System Instruments Ltd.
- GDS (2001). *The GDS 8 Channel Serial Data Acquisition Pad, 8 Channel Serial Pad*. Global Digital System Instruments Ltd.
- GDS (2001). *The GDS Standard Digital Controller, Firmware Revision 3.3, STDDPC*. Global Digital System Instruments Ltd.
- GDS (2003). *The GDS Laboratory Users Handbook, GDSLAB v2*. Global Digital System Instruments Ltd.
- Gilboy, G. (1936). *Improved soil testing methods*. Engineering News Record.
- Gorman, C.T., Hopkins T.C., Deen, R.C., Drnevich, V.P. (1978). *Constant rate of strain and controlled gradient consolidation testing*. Geotechnical Testing Journal, Vol.1, No.1, pp. 3-15.
- Hamilton, J.J., Crawford, C.B. (1959). *Improved Determination of Preconsolidation pressure of a Sensitive Clay*. Symposium on Time Rates of Loading in Soil Testing. American Society for Testing and Materials, pp. 254-271.
- Head, K.H. (1986). *Manual of soils laboratory test: Rowe cell consolidation and permeability tests*. International Limited London, Vol.3, Cap.24, pp. 1124-1196.
- Janbu, N., Tokheim, O., Senneset, K. (1981). *Consolidation tests with continuous loading proceedings*. X Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Estocolmo. Vol.3, pp. 645-654.
- Khan, M.A., Garga, V.K. (1994). *A simple design for hydraulic consolidometer and volume gauge*. Canadian Geotechnical Journal, Vol.31, pp 769-772.
- Lee, K., Choa, V., Lee, S.H., Quek, S.H. (1993). *Constant rate of strain consolidation of Singapore marine clay*. Géotechnique, Vol.43, No.3, pp. 471-488.
- Leonards, G.A., Girault, P. (1961). *A study of the one-dimensional consolidation test. Proceeding*. IX ICSMFE, Paris, Vol.1, pp.116-130.
- Leroueil, S; Samsom, L; Bozozuk, M. (1983). *Laboratory and Field Determination of Preconsolidation Pressures at Gloucester*. Canadian Geotechnical Journal Vol.20 No.3 pp. 477-490.
- LNEC. (1965). NP-84 *Determinação do teor em água*. Norma Portuguesa Definitiva, 1-2.
- LNEC. (1966). E 197–1966 *Ensaio de Compactação*. Especificação LNEC, 1-8.
- LNEC. (1966). E196–1966 *Análise Granulométrica*. Especificação LNEC, 1-8.
- LNEC. (1969). NP–143 *Determinação dos Limites de consistência*. Norma Portuguesa Definitiva, 1-6.

- Lowe, J., Zaccheo, P.F., Feldman, H.S. (1964). *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. American Society of Civil Engineers. Vol. 90, pp. 69-86.
- Lowe, J., Jones, E., Obrician, V. (1969). *Controlled Gradient Consolidation Test Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*. Vol. 95, pp. 77-97.
- Maranha das Neves, E. (2001). *Mecânica dos Solos*, Instituto Superior Técnico.
- Mineiro, A.J.C. (1978). *Mecânica dos Solos e Fundações*, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.
- Montemazzo, R.F. (2005). *Estudo comparativo de ensaios de compressão confinada em argilas e areias saturadas utilizando o ensaio CRS*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Premchitt, J., Ho, K.S., Evans, N.C. (1996). *Conventional and CRS Rowe cell consolidation test on some Hong Kong clays*. Geotechnical Engineering Office, Geo Report No.55.
- Rowe, P.W., Barden, L. (1966). *A new consolidation cell*. *Géotechnique*, Vol.16, No.2, pp. 162-170.
- Sällfors, G. (1975). *Pressure of Soft High Plastic Clays*. Ph.D Thesis, Chalmers University of Technology. Sweden.
- Santana, T. (2005). *Mecânica dos Solos C*. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.
- SETRA/LCPC. (1992). *Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) – Guide technique*. Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagement/Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Shehan, T.C., Watters, P.J. (1996). *Using an automated Rowe cell for constant rate of strain consolidation testing*. *Geotechnical Testing Journal*, Vol.19 No.4 pp. 354-363.
- Shields, D.H., Rowe P.W., (1965). *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, Vol. 91, pp. 15-23.
- Shroff, A.V., Shah, D.L. (2003). *Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, A.A. Balkema Publishers, pp. 258-298.
- Sills, G.C., Hoare, S.D., Baker, N. (1986). *An experimental Assessment of the Restricted Flow Consolidation Test*. *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*, ASTM STP 892, Philadelphia, pp. 203-216.
- Silvestrini, V. et al. (1969). *Controlled Gradient and Standard Consolidation Test of Sensitive Clays. Consolidation of soils: Testing and Evolution*. American Society of Testing and Materials, Philadelphia, pp. 433-450.
- Skempton, A.W, Sowa, V.A. (1963). *Behavior of saturated clays during sampling and testing*. *Géotechnique* 13, No. 4, pp. 262-290.
- Smith, R.E., Wahls, H.E. (1969). *Consolidation Under Constant Rates of Strain. Journal of Soils Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 95 pp. 519-539.

Taylor , D.W. (1942). *Research on consolidation of clays*. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Sanitary Engineering, Cambridge.

Universidade de Coimbra. *Ensaio Edométrico*, Laboratório de Geotecnia e Fundações do DEC.

## **ANEXO A**

### **Preparação da amostra e montagem do provete na célula de Rowe**



### **Preparação da amostra e montagem do provete**

Para preparar a amostra, utilizaram-se alguns utensílios auxiliares para a perfeita compactação da amostra, desde uma raseira com aresta biselada, tabuleiros, espátulas, colheres de pedreiro, provetas graduadas, uma balança de precisão com limite de erro de  $\pm 1$  g e ainda um extractor de provetes em alavanca.

A técnica a utilizar para a compactação do provete a utilizar no ensaio baseou-se integralmente na norma a que se fez referência na secção 5.3. Norma esta que define que, após a passagem do material seco pelo peneiro nº4, se retiram 2 kg de material, sendo posteriormente dividido em 6 fracções. Sendo cada uma destas posteriormente misturadas com a quantidade de água que se pretende adicionar.

Deve apertar-se à base o molde com a alonga fixada e dividir-se o solo em 3 partes idênticas. Coloca-se então uma das partes no molde pequeno, compacta-se o solo com 25 pancadas do pilão leve distribuídas de forma uniforme sobre a superfície, repetindo-se o processo posteriormente para as restantes duas partes de material ainda não compactado.

Ao retirar-se a alonga deve rasar-se de forma cuidada o molde, preenchendo-se qualquer falha observada, retira-se o molde da base, pesando-o de seguida, utilizando-se o valor para cálculos futuros, Por fim o provete é extraído do molde utilizando-se o extractor de provetes em alavanca.

Utiliza-se o provete após compactado nos ensaios de consolidação, bem como na determinação do teor em água existente.

Após a compactação do provete procede-se à sua colocação na célula de Rowe; apresenta-se então de forma mais pormenorizada a montagem a que se fez referência na secção 5.5.1.

Para a montagem do provete na célula de Rowe deve cravar-se o anel na amostra compactada, preenchendo-se os espaços existentes no anel com pequenos pedaços da amostra, aparando e nivelando a mesma para evitar a existência de espaços entre a amostra e o anel (Figura E.1), determinam-se então a massa, altura e diâmetro do provete.



**Figura E.1 – Provete a colocar na célula de Rowe**

O anel mais pequeno é colocado sobre a placa porosa existente na base da célula, e afasta-se o “o-ring” para baixo com o auxílio do anel de maiores dimensões.

Cobre-se a base da célula com uma película de água deionizada, e coloca-se o conjunto provete mais anel após ser pesado na base da célula utilizando-se o pilão para empurrar até à placa porosa inferior.

Tendo em conta os cuidados necessários para evitar a vibração, distorção e a compressão deve retirar-se o anel com que se cravou a amostra compactada, e pesa-se o mesmo.

Coloca-se a placa porosa superior com a parte rugosa em contacto com o provete. De seguida aplica-se sobre toda a superfície da membrana massa de silicone (Figura E.2), devendo garantir-se que o “o-ring” superior se encontra na posição correcta.



**Figura E.2 – Aplicação do silicone na superfície da membrana**

Em seguida fecha-se a célula, devendo garantir-se que não existe ar retido entre o diafragma e o corpo da célula através da selagem cuidada da célula. Deve abrir-se a válvula de drenagem para que qualquer excesso de água sob pressão existente entre o diafragma e as paredes interiores do corpo da célula possa ser expulso.

Os vários parafusos, porcas e anilhas devem colocar-se de forma uniforme e ser apertados sequencial e parcialmente para se evitar o desnivelamento do topo da célula.

Instala-se o deflectómetro no suporte rígido ligado ao topo da célula, centrando-o com o eixo existente no topo da célula, após fechar a célula efectua-se as ligações ao sistema GDSLab.



## **ANEXO B**

### **Preparação da célula de Rowe para a implementação da BS 1377 no ensaio de consolidação**



### **Preparação da célula para o ensaio de consolidação**

Antes da primeira utilização da célula deve efectuar-se a calibração dos transdutores para que se eliminem alguns erros que podem estar relacionados com a não calibração dos mesmos, deve verificar-se a disponibilidade da totalidade dos equipamentos a utilizar: as componentes, ferramentas e acessórios. Deve ainda garantir-se a existência da quantidade de água dearificada necessária.

A base, o corpo e o topo da célula devem encontrar-se limpos e secos. Para que o “o-ring” e o diafragma garantam o isolamento adequado, as zonas de contacto entre o corpo e a célula não devem estar danificadas. O “o-ring” deve ser devidamente colocado na ranhura existente na base da célula, devendo ainda aplicar-se-lhe pasta de silicone ao mesmo bem como nas zonas de selagem do topo e da base da célula.

Deve assegurar-se que o diafragma não permite fugas de água, e que se encontra devidamente ajustado ao eixo drenante e que desliza livremente ao longo do seu curso.

As inserções cilíndricas porosas existentes na base da célula, necessitam estar bem ajustadas às reentrâncias correspondentes.

Os discos porosos de bronze devem ser fervidos em água destilada durante pelo menos 10 minutos, com o objectivo de se remover o ar existente no interior dos mesmos, devendo permanecer submersos até ao momento exacto da sua utilização. Cuidado idêntico deve ser tomado com as inserções cilíndricas porosas.

A saturação dos vários circuitos hidráulicos existentes na célula de Rowe deve realizar-se antes da montagem dos componentes da célula, pois para além de se verificar a correcta funcionalidade dos mesmos, previne-se ainda a existência de bolhas de ar neste mesmos circuitos, que envolvem válvulas que ao longo do ensaio vão ser por diversas vezes utilizadas, pelo que se deve ainda verificar que as válvulas não se encontram obstruídas.

No entanto para solos expansivos a saturação dos circuitos hidráulicos apenas deve ser feita após a colocação e selagem do provete no interior da célula e estando o mesmo sujeito a uma pressão que contrarie a tensão de expansão do solo.



## **ANEXO C**

### **Implementação da BS 1377 para o ensaio de consolidação na célula de Rowe**



### Implementação da BS no ensaio de consolidação

Após a aplicação de uma pressão inicial  $\sigma_0$  no provete, registou-se o valor inicial da pressão intersticial  $u_0$ , mantendo-se a válvula da contrapressão fechada. Aumentou-se então a pressão na célula  $\sigma_1$ , para se determinar o primeiro patamar de carga no provete, observou-se o gráfico de pressão intersticial até que esta atinja um valor constante.

Após a pressão intersticial  $u_1$  estabilizar determinou-se então o valor de do coeficiente:

$$\frac{\delta u}{\delta \sigma} = \frac{u_1 - u_0}{\sigma_1 - \sigma_0}.$$

Mantendo-se a válvula da contrapressão fechada incrementou-se a tensão na câmara e a contrapressão para um valor em 50 kPa superior ao que se tinha,  $\sigma_2$ , e aguardou-se até o volume estabilizar.

Quando o valor da pressão intersticial igualou o valor da contrapressão aplicada e a variação de volume terminou registou-se o valor de ambos  $u_2$  e  $v_2$  e voltou a fechar-se a válvula da contrapressão.

Aplicou-se um novo incremento de pressão  $\sigma_3$ , e tal como definido pela BS 1377, procedeu-se da mesma forma que a partir do momento em que se aplicou a pressão  $\sigma_1$ .

Calculou-se então  $\frac{\delta u}{\delta \sigma} = \frac{u_3 - u_2}{\sigma_3 - \sigma_2}$ , concluiu-se o processo quando  $\delta u / \delta \sigma$  atingiu o valor definido pela BS para o final da saturação.

Deve ter-se em consideração que na saturação do provete na célula de Rowe, o orifício responsável pela mesma pode encontrar-se obstruído aumenta a complexidade deste procedimento se não forem tomadas as devidas precauções.

No início do carregamento não drenado fecharam-se as válvulas de pressão na câmara bem como a válvula da contrapressão. De seguida aplicou-se um incremento de carga e abriu-se a válvula da pressão na câmara, tal como definido na BS aguardou-se que o gráfico de excesso de pressão intersticial em função do tempo estabilizasse.

Após a pressão intersticial estabilizar, deu-se início à consolidação ao abrir-se a válvula da contrapressão e iniciar-se a leitura a tempos da pressão intersticial tal como definido na norma, sendo a escala de leituras a mesma que se utilizou no ensaio edométrico. Utilizando os valores das leituras a tempos da pressão intersticial executou-se o gráfico da curva de pressão intersticial em função do tempo para os patamares de carga.

Após a consolidação terminar, isto é, no mínimo 95% do excesso de pressão intersticial ter sido dissipado, voltou a fechar-se tanto a válvula da pressão na câmara como da contrapressão, medindo-se os valores da pressão intersticial do deslocamento e da variação do volume.

De seguida incrementou-se a pressão na câmara de acordo com o plano de carregamento estabelecido, procedeu-se de igual forma para todos os patamares de carga e descarga até ao final da fase de consolidação, por limitações do equipamento o ensaio termina para tensões na ordem dos 1000 kPa.





## **ANEXO D**

### **Boletins de ensaio resultantes da implementação da BS 1377 na célula de Rowe**



## Características do ensaio de consolidação

Quadro E.1 – Características do ensaio de consolidação

Implementação da norma BS na célula de Rowe: características do ensaio de consolidação					
Localização: Laboratório de mecânica dos solos do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa					
Data: 17 de Dezembro de 2010					
Método da BS 1377:Part 6: 1990:					
Condições de drenagem: Drenagem vertical em uma direcção					
Condições de carregamento: Em superfície de actuação de carga flexível					
Medição da pressão intersticial: Na base da célula de Rowe					
Tipo de amostra/compactação: Amostra remoldada/dinâmica					
Detalhes do Provete					
Diâmetro	[mm]	100	Volume	[mm <sup>3</sup> ]	125,66
Altura inicial do provete H <sub>0</sub>	[mm]	16	Densidade		1,67
Área	[mm <sup>2</sup> ]	7853,98	Grau de Saturação inicial [%]		52
Pesagens		Antes do Ensaio			Após o Ensaio
Célula nº		1			1
massa provete húmido + anel		[g]	471,30		503,12
massa do anel		[g]	210,72		210,72
massa provete húmido		[g]	260,58		292,40
Teor em água		[%]	11,45		11,97
Índice de vazios		e	0,278		0,16
Operador - João Emanuel Pereira Gandaio					

O índice de vazios inicial foi determinado com base na seguinte expressão:

$$e_{\text{inicial}} = \frac{\text{altura inicial do provete} - \text{altura da parte sólida}}{\text{altura da parte sólida}}$$

em que:

$$\text{altura da parte sólida} = \frac{\text{massa do provete seco}}{\text{área} \times G}$$

O índice de vazios após o ensaio foi determinado através da seguinte expressão:

$$e_{\text{final}} = \frac{\text{altura inicial do provete} - \text{altura da parte sólida} - \text{deslocamento axial}}{\text{altura da parte sólida}}$$

**Saturação****Quadro E.2 – Boletim referente à fase de saturação**

Implementação da norma BS 1377 na célula de Rowe: fase de saturação						
Localização: Laboratório de mecânica dos solos do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa						
Data: 20 de Dezembro de 2010						
Método da BS 1377:Part 6: 1990:						
Condições de drenagem: Drenagem vertical em uma direcção						
Medição da pressão intersticial: Na base da célula de Rowe						
Condições Iniciais						
Pressão		[kPa]	30	Deslocamento axial [mm]		0
Pressão intersticial		[kPa]	13,8	Contrapressão [kPa]		20
Saturação						
Tensão no diafragma $\rho$ [kPa]	Tensão no provete [kPa]		Contrapressão [kPa]	Pressão intersticial [kPa]		$\delta u/\delta \sigma$
	Valor $\sigma$	Incremento $\Delta \sigma_v$		Leitura $u_b$	Incremento $\delta u$	
30	30	10	20	13,8	19,1	0,53
90	90	-	80	-	-	-
90	90	9	80	73,8	82,2	0,93
100	100	-	90	-	-	-
100	100	10	90	83,4	93,0	0,96
Operador - João Emanuel Pereira Gandaio						

Apresentam-se de seguida as leituras e os cálculos realizados para o incremento de tensão na câmara de 160 kPa para 210 kPa.

## Leituras na consolidação

**Quadro E.3 – Boletim referente às leituras durante a fase de consolidação**

Implementação da norma BS 1377 na célula de Rowe: leituras na consolidação						
Localização: Laboratório de mecânica dos solos do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa						
Data : 7 de Janeiro de 2011						
Método da BS 1377:Part 6: 1990:						
Condições de drenagem: Drenagem vertical em uma direcção						
Medição da pressão intersticial: Na base da célula de Rowe						
Patamar de Carga: estágio 10						
Carregamento Não Drenado						
Tensão inicial no diafragma $\rho_0$ [kPa]		160		Pressão intersticial inicial $u_i$ [kPa]		110
Tensão inicial no provete $\sigma_0$ [kPa]		160		Deslocamento axial inicial [mm]		0,09
Contrapressão $c_p$ [kPa]: 110						
Build-up pressão intersticial				Depois do build-up		
Tempo [min.]	Pressão intersticial [kPa]		$\rho_d$ [kPa]		210,00	
0	110,1		$\sigma_d$ [kPa]		210,00	
0,5	147,2		$u_d$ [kPa]		145,80	
1	152,5		Deslocamento axial [mm]		0,10	
1,5	152,4		Excesso pressão intersticial ( $u_d - c_p$ ) [kPa]		35,8	
2	152,5					
Tensão efectiva $\sigma'$ [kPa] 100						
Consolidação						
Tempo decorrido t [min.]	$\sqrt{t}$	Pressão intersticial [kPa]			Deslocamento axial [mm]	
		Valor u [kPa]	Diferença ( $u_i - u$ ) [kPa]	Dissipação U [%]	Leitura	Diferença $\Delta H$
0	0,00	145,60	0,00	0,00	0,10	0,00
0,25	0,50	145,50	0,10	0,28	0,11	0,01
0,5	0,71	145,40	0,20	0,56	0,11	0,01
1	1,00	143,30	2,30	6,42	0,11	0,01
2	1,41	140,20	5,40	15,08	0,11	0,01
4	2,00	134,90	10,70	29,89	0,13	0,03
8	2,83	128,30	17,30	48,32	0,16	0,06
15	3,87	121,70	23,90	66,76	0,19	0,09
30	5,48	113,90	31,70	88,55	0,25	0,15
60	7,75	110,80	34,80	97,21	0,29	0,19
120	10,95	110,00	35,60	99,44	0,30	0,20
240	15,49	110,00	35,60	99,44	0,31	0,21
480	21,91	110,00	35,60	99,44	0,32	0,22
1440	37,95	110,00	35,60	99,44	0,32	0,22
Operador - João Emanuel Pereira Gandaio						

### Características do ensaio de consolidação

#### Quadro E.4 – Boletim referente aos cálculos realizados

Implementação da norma BS 1377 na célula de Rowe: cálculos			
Localização: Laboratório de mecânica dos solos do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa			
Data: 25 de Fevereiro de 2011			
Método da BS 1377:Part 6: 1990:			
Condições de drenagem: Drenagem vertical em uma direcção			
Condições de carregamento: Em superfície de actuação de carga flexível			
Medição da pressão intersticial: Na base da célula de Rowe			
Diâmetro [mm]	100	Índice de vazios inicial $e_0$ :	0,275
Altura inicial do provete $H_0$ [mm]	16	Patamar de carga:	Estágio nº 10
Coeficiente de consolidação determinado pelo método da dissipação da pressão intersticial			
Cálculos			
Tensão efectiva [kPa]		Assentamento	Altura da do provete
Valor $\sigma'$	Incremento $\delta\sigma'$	$\Delta h$ [mm]	H [mm]
50	50	0,32	15,68
Variação do índice de vazios			
Acumulado $\Delta e$	Incremento $\delta e$		Índice de Vazios
0,015	0,009		0,260
Tempo $t_{50}$ [min.]	Altura média $H$ [mm]		Coeficiente de consolidação $c_v$ [cm <sup>2</sup> /min]
9	15,79		0,105
Operador - João Emanuel Pereira Gandaio			

## **ANEXO E**

### **Determinação dos coeficientes de consolidação pelos métodos de Taylor, Casagrande e pelo método da dissipação da pressão intersticial**





### Método de Taylor ( $c_v$ )

Patamar de carga  $\sigma'_v = 98$  kPa Normalmente consolidado

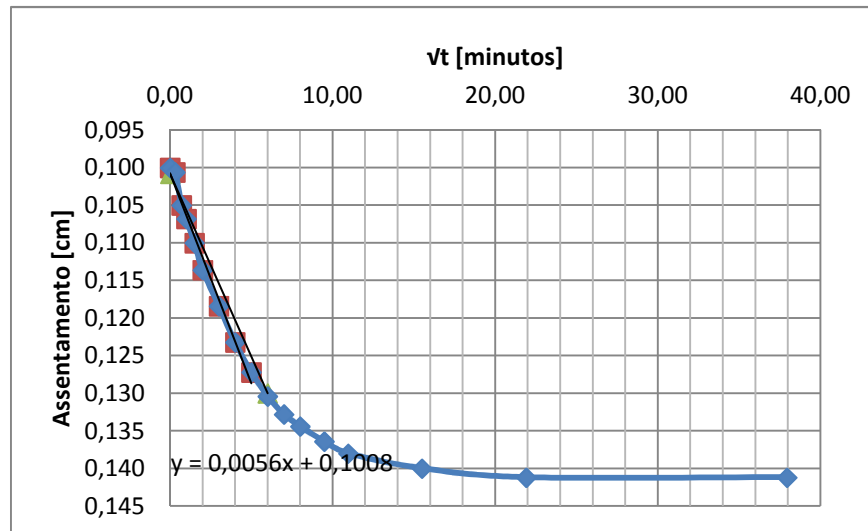


Figura E.3 – Determinação do  $c_v$  pelo método de Taylor para  $\sigma'_v = 98$  kPa

Patamar de carga  $\sigma'_v = 12,5$  kPa OCR = 15,7

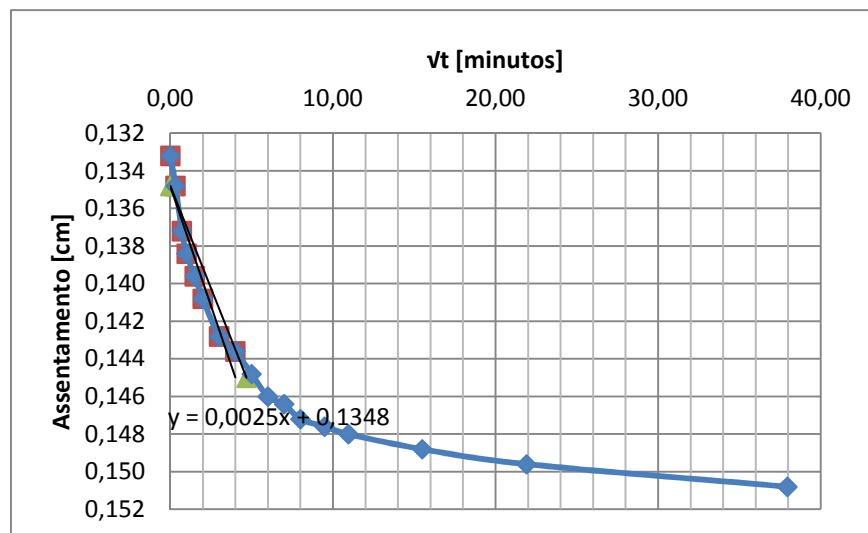


Figura E.4 – Determinação do  $c_v$  pelo método de Taylor para  $\sigma'_v = 12,5$  kPa e OCR = 15,7

Patamar de carga  $\sigma'_v = 196$  kPa Normalmente consolidado

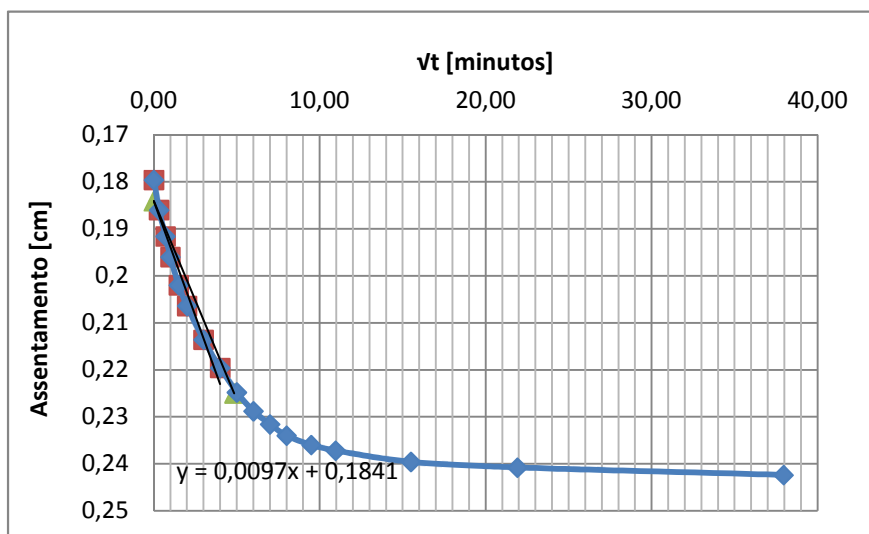


Figura E.5 – Determinação do  $c_v$  pelo método de Taylor para  $\sigma'_v = 196$  kPa

Patamar de carga  $\sigma'_v = 391$  kPa Normalmente consolidado

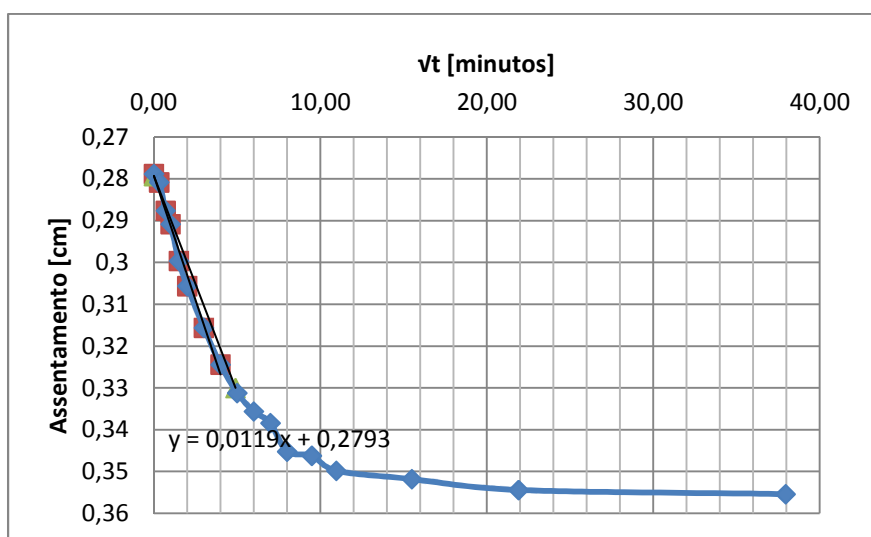


Figura E.6 – Determinação do  $c_v$  pelo método de Taylor para  $\sigma'_v = 391$  kPa

Patamar de carga  $\sigma'_v = 12,5$  kPa OCR = 62,6

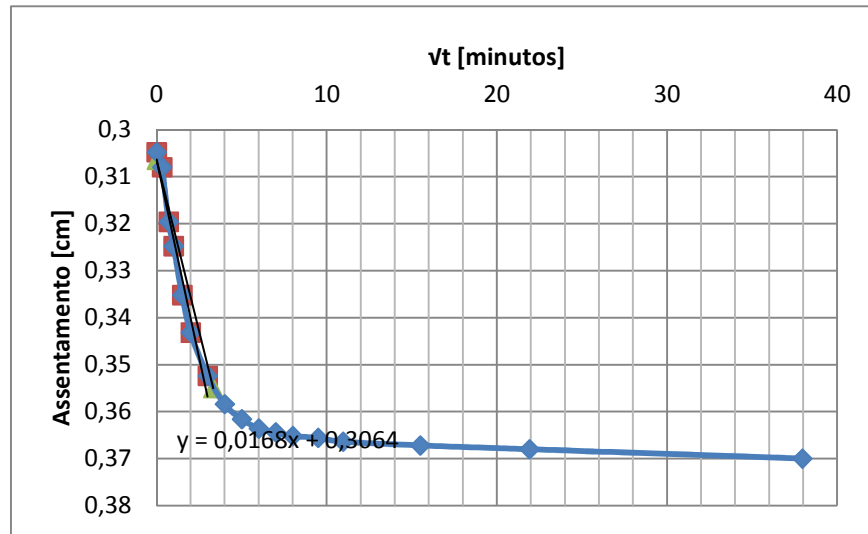


Figura E.7 – Determinação do  $c_v$  pelo método de Taylor para  $\sigma'_v = 12,5$  kPa e OCR = 62,6

### Método de Casagrande ( $c_v$ )

Patamar de carga  $\sigma'_v = 98$  kPa Normalmente consolidado

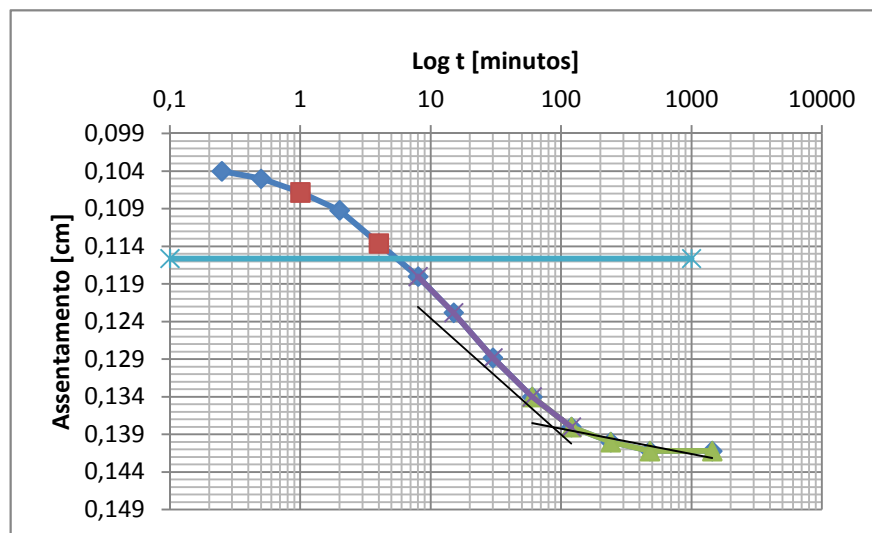


Figura E.8 – Determinação do  $c_v$  pelo método de Casagrande para  $\sigma'_v = 98$  kPa

Patamar de carga  $\sigma'_v = 12,5$  kPa OCR = 15,7

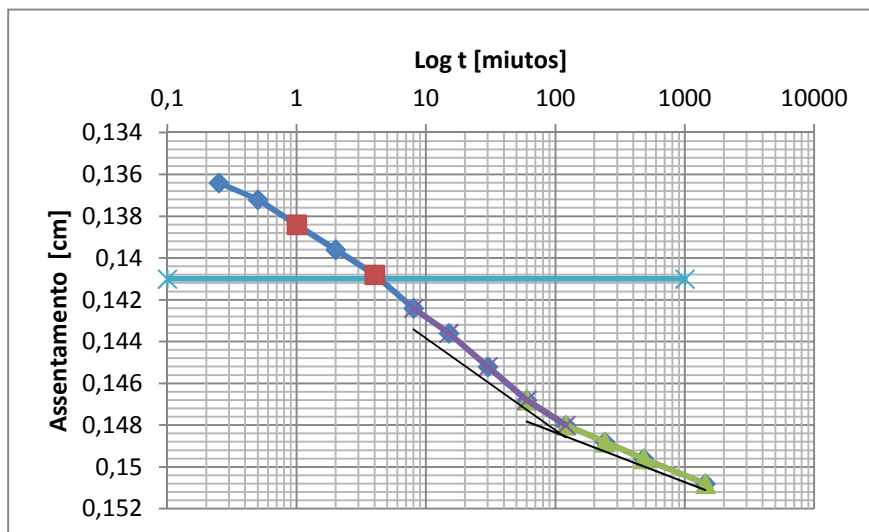


Figura E.9 – Determinação do  $c_v$  pelo método de Casagrande para  $\sigma'_v = 12,5$  kPa e OCR = 15,7

Patamar de carga  $\sigma'_v = 196$  kPa Normalmente consolidado

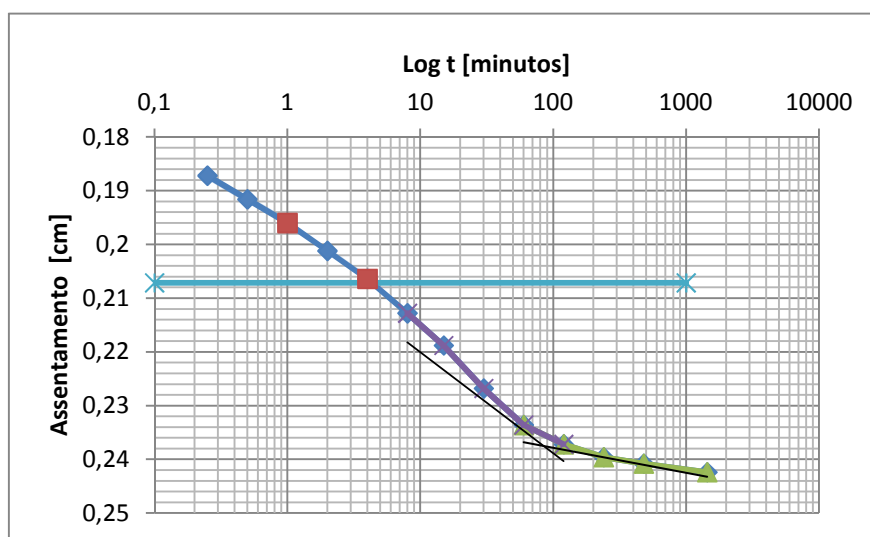


Figura E.10 – Determinação do  $c_v$  pelo método de Casagrande para  $\sigma'_v = 196$  kPa

Patamar de carga  $\sigma'_v = 391$  kPa Normalmente consolidado

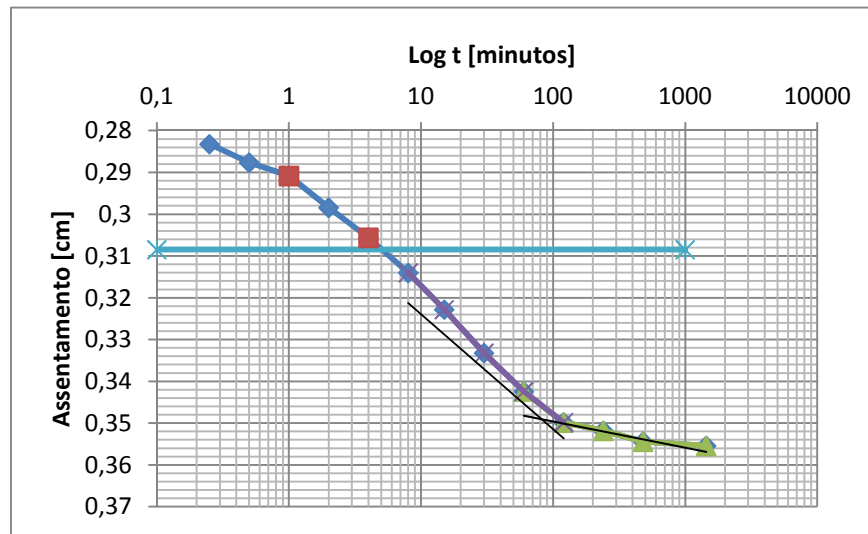


Figura E.11 – Determinação do  $c_v$  pelo método de Casagrande para  $\sigma'_v = 391$  kPa

Patamar de carga  $\sigma'_v = 12,5$  kPa OCR = 62,6

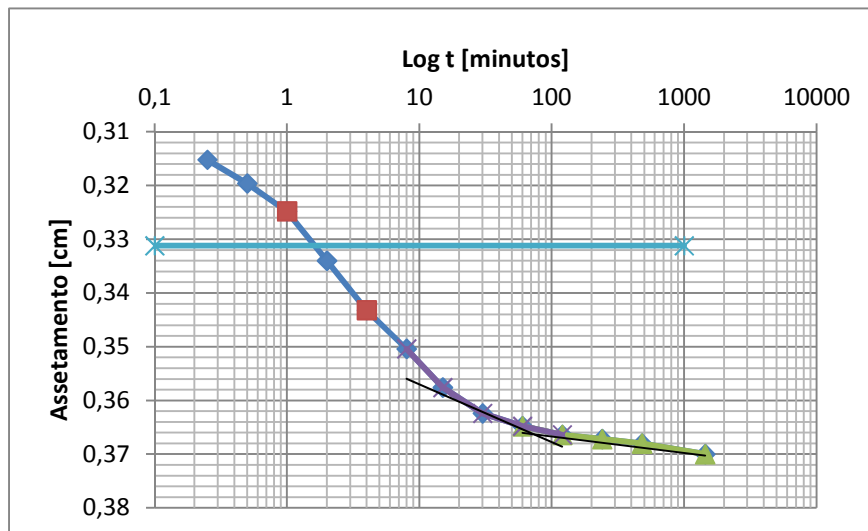


Figura E.12 – Determinação do  $c_v$  pelo método de Casagrande para  $\sigma'_v = 12,5$  kPa e OCR 62,9

### Método da dissipação da pressão intersticial ( $c_v$ )

Patamar de carga  $\sigma'_v = 50$  kPa OCR = 1,25

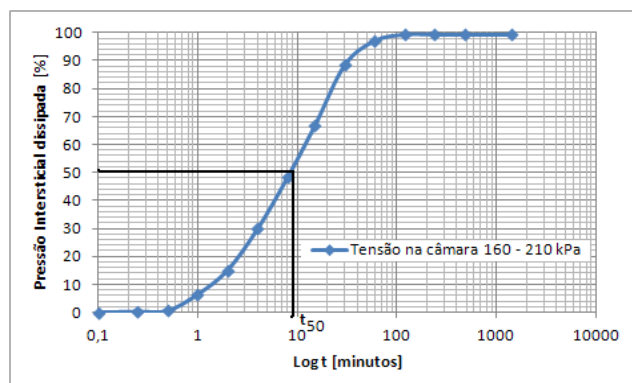


Figura E.13 – Determinação do  $c_v$  pelo método da dissipação da pressão intersticial para  $\sigma'_v = 50$  kPa

Patamar de carga  $\sigma'_v = 200$  kPa Normalmente Consolidado

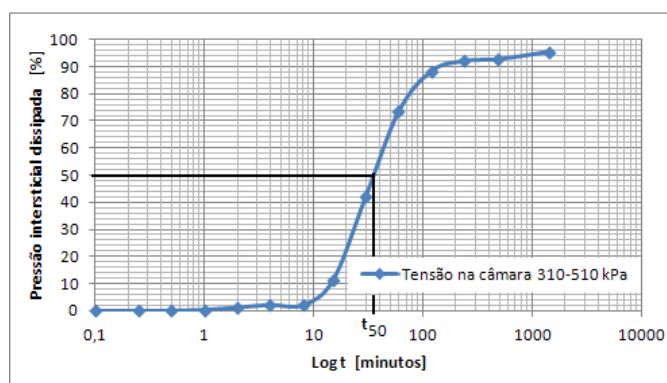


Figura E.14 – Determinação do  $c_v$  pelo método da dissipação da pressão intersticial para  $\sigma'_v = 200$  kPa

Patamar de carga  $\sigma'_v = 400$  kPa Normalmente Consolidado

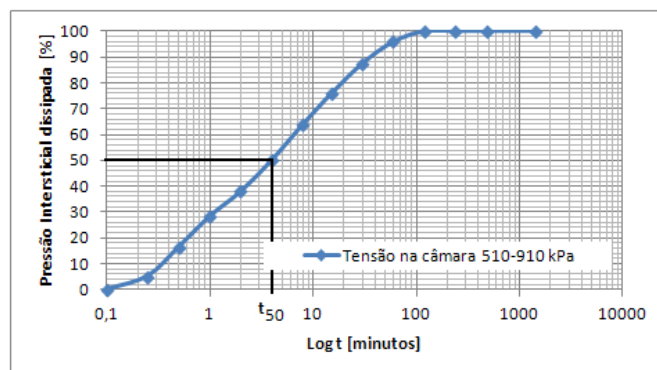


Figura E.15 – Determinação do  $c_v$  pelo método da dissipação da pressão intersticial para  $\sigma'_v = 400$  kPa